Environnement Canada Environment Canada

Institut national de recherche en hydrologie

Rapport INRH N° 31
ÉTUDE N° 160, SÉRIE SCIENTIFIQUE DE LA DGEI

Caractérisation hydrogéologique de la zone de recherche du lac East Bull

K.G. Raven*, D.J. Bottomley, R.A. Sweezey, J.A. Smedley et T.J. Ruttan

* Maintenant avec :
INTERA Technologies Ltd.
1525 avenue Carling, Bureau 600
Ottawa (Ontario) Canada
K1Z 8R9

Cette publication est le rapport final sur les études hydrogéologiques, sous la direction de la Section de l'hydrogéologie des contaminants, Institut national de recherche en hydrologie, Direction générale des eaux intérieures et des terres, Environnement Canada, pour la Direction de la géoscience appliquée, Énergie atomique du Canada Ltée, Pinawa (Manitoba), Canada R0E 1L0.

INRH

DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES ET DES TERRES
INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE
CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE
SASKATOON (SASKATCHEWAN) 1987
(Available in English on request)

Publié avec l'autorisation
du ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

Nº de cat. En 36-502/160F

ISBN 0-662-94604-9

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	viii
REMERCIEMENTS	ix
1. INTRODUCTION	1
2. DESCRIPTION DE L'EMPLACEMENT	2
Situation de l'emplacement	2
Réseau hydrographique	2
Géologie	2
3. PROGRAMME DE FORAGE	9
4. ESSAIS DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE	15
Sondages de la série P	15
Méthode	15
Essais de pompage dans des sondages à découvert	15
Essais à packers	15
Résultats et interprétation	16
Sondages de la série LEB	18
Méthode	19
Essais de 1983	19
Essais de 1984	22
Essais de 1985	23
Résultats et interprétation	23
Sondage LEB-1	24
Sondage LEB-2	26
Sondage LEB-3	27
Sondage LEB-4	27
5. INSTALLATION DES TUBAGES À PLUSIEURS PACKERS	31
6. CONTRÔLE DE LA CHARGE HYDRAULIQUE	36
Méthode	36
Résultats et interprétation	36
Sondages de la série P	36
Sondages de la série LEB	37
7. RECHERCHES HYDROGÉOCHIMIQUES	41
Méthode	41
Résultats	42
Représentativité des échantillons	42
Échantillonnage de 1984	45
Éléments principaux et secondaires et métaux à l'état de traces	45
Gaz dissous	49
Isotopes de l'environnement	50
Échantillonnage de 1985	51
Analyse	51

Table des matières (suite)

Page

8. SYNTHÈSE ET RÉSUMÉ 54

RÉFÉRENCES 57

ANNEXE A. Résumé des résultats des essais au packer double, sondages P-1 à P-14 . . . 59

ANNEXE B. Résumé des mesures de la hauteur piézométrique, sondages LEB-1, 2, 3 et 4, octobre 1984 à octobre 1985 67

ANNEXE C. Méthodes analytiques pour les éléments principaux et secondaires et les métaux à l'état de traces 77

Tableaux

1. Longueur et orientation des sondages 9
2. Coordonnées relatives des sondages et altitude des tubages en surface 9
3. Propriétés hydrauliques des sondages à découvert de la série P 17
4. Sommaire des résultats des essais à packers de 1983 pour le sondage LEB-1 23
5. Sommaire des résultats des essais à packers de 1983 pour le sondage LEB-2 23
6. Sommaire des résultats des essais avec PIP de 1984 pour les sondages de la série LEB 24
7. Sommaire des essais d'hydraulique de 1985 dans les sondages de la série LEB 24
8. Sommaire des installations de tubages à plusieurs packers dans les sondages de la série LEB 31
9. Altitudes des sections d'essai dans les sondages de la série LEB 31
10. Charges hydrauliques dans les structures des alignements 050 et 130 et à la base de l'horizon de troctolite 37
11. Charges hydrauliques mesurées pendant les essais avec PIP de 1984 38
12. Résultats de la vérification de l'intégrité des tubages à plusieurs packers dans les sondages LEB-1 et LEB-2 38
13. Sommaire des dosages les plus représentatifs pour 1984, des éléments principaux et secondaires de l'eau souterraine dans les sondages de la série P et de la série LEB du lac East Bull 43
14. Sommaire des concentrations de métaux à l'état de traces obtenues en 1984 dans les eaux souterraines des sondages de la série P et de la série LEB 44
15. Dosages les plus représentatifs des éléments principaux et secondaires des échantillons d'eau souterraine prélevés dans certaines sections des sondages de la série LEB en 1985 44
16. Concentrations représentatives des métaux à l'état de traces dans les eaux souterraines de certaines sections des sondages de la série LEB en 1985 45
17. Composition en gaz dissous des eaux souterraines du lac East Bull 47
18. Concentrations d'hélium et de néon, er rapport $^{3}He/^{4}He$ dans les eaux souterraines des sondages LEB en 1984 47
19. Composition isotopique des eaux souterraines du lac East Bull et 1984 48

Illustrations

Page

Figure 1. Carte situant la zone de recherche du lac East Bull 3
Figure 2. Topographie et réseau hydrographique régionaux de la zone de recherche du lac East Bull 4
Figure 3. Topographie et emplacement des sondages dans la zone d'étude immédiate, zone de recherche du lac East Bull 5
Figure 4. Géologie du plateau central du pluton du lac East Bull 6
Figure 5. Emplacement des sondages et alignements structuraux identifiés par photographies aériennes dans la zone d'étude, zone de recherche du lac East Bull 7
Figure 6. Coupe lithologique et structurale sommaire du sondage LEB-1 10
Figure 7. Coupe lithologique et structurale sommaire du sondage LEB-2 11
Figure 8. Coupe lithologique et structurale sommaire du sondage LEB-3 12
Figure 9. Coupe lithologique et structurale sommaire du sondage LEB-4 13
Figure 10. Schéma du packer double de sondage utilisé dans les essais d'écopage-rétablissement pour les sondages de la série P 15
Figure 11. Histogramme de la distribution du logarithme décimal de la conductivité hydraulique de la masse rocheuse équivalente, K_{erm}, déterminée d'après les essais à packers entre 0 et 75 m de profondeur dans les zones de recherche du lac East Bull et de Chalk River 18
Figure 12. Courbe de probabilité cumulative du logarithme décimal de la conductivité hydraulique d'une masse rocheuse équivalente, K_{erm}, déterminée d'après les essais à packers entre 0 et 75 m de profondeur dans les zones de recherche du lac East Bull et de Chalk River 18
Figure 13. Câble ombilical et dévidoir électrique utilisés pendant les essais à packers dans le sondage LEB-1 en 1983 19
Figure 14. Schéma du packer double de sondage et du câble ombilical utilisés pendant les essais à packers dans le sondage LEB-1 en 1983 19
Figure 15. Schéma du piston et de la soupape incorporés dans le packer double de sondage utilisés pour vérifier hydrauliquement le sondage LEB-1 en 1983 20
Figure 16. Schéma de l'équipement de mesure des débits et de mise sous pression utilisé pendant les essais à packers dans le sondage LEB-1 en 1983 21
Figure 17. Schéma du système d'acquisition des données utilisé pendant les essais à packers dans le sondage LEB-1 en 1983 21
Figure 18. Schéma de l'équipement utilisé pour les essais d'hydraulique montrant l'installation de reconditionnement de l'appareil de pistonnage et le packer d'injection-production (PIP) 21
Figure 19. Profil de débit par unité de charge ($Q/\Delta H$) pour les sondages LEB-1 et LEB-2, déterminés à partir des essais à packers de 1983 et des essais à PIP de 1984 25
Figure 20. Variations de la charge hydraulique dans les sections d'observation LEB et variation de la pression barométrique en fonction du logarithme du temps pendant l'essai de pompage dans le sondage LEB-1 de la zone fracturée de troctolite, à 210 m de profondeur 25
Figure 21. Courbe log-log de rabattement en fonction du temps pour l'essai de pompage dans le sondage à découvert LEB-1 27
Figure 22. Résultats de l'étude débitmétrique du sondage LEB-4 de la United States Geological Survey, 1984 28

Illustrations (suite)

Page

Figure 23. Courbe de la conductivité spécifique du fluide soutiré en fonction du volume cumulé de fluide produit pendant quatre périodes de pompage, dans la zone fracturée à 454 m de profondeur dans le sondage LEB-4 29
Figure 24. Courbe log-log de rabattement en fonction du temps pour l'essai de pompage dans le sondage à découvert LEB-4. 29
Figure 25. Résultats de l'essai de rabattement par étape dans le sondage LEB-4 30
Figure 26. Coupe lithologique et hydrogéologique combinée pour le sondage LEB-1. . . . 32
Figure 27. Coupe lithologique et hydrogéologique combinée pour le sondage LEB-2. . . . 33
Figure 28. Coupe lithologique et hydrogéologique combinée pour le sondage LEB-3. . . . 34
Figure 29. Coupe lithologique et hydrogéologique combinée pour le sondage LEB-4. . . . 35
Figure 30. Courbe de la conductivité électrique en fonction du volume d'eau soutiré dans LEB-4 (429 à 456 m) en 1985. 44
Figure 31. Carte de la nappe phréatique de la zone LEB basée sur les mesures du niveau de l'eau prises dans tous les sondages le 2 mai 1984 et la topographie de la région 46
Figure 32. Concentrations de N_2 et d'Ar dans les eaux souterraines de la série LEB et de la série P. 49
Figure 33. Courbe de la composition en isotope stables (^{18}O-^{2}H) des eaux souterraines LEB, basée sur l'échantillon le plus représentatif prélevé dans chaque section d'essai 50
Figure 34. Courbe trilinéaire de la composition en ions principaux des eaux souterraines de LEB. 52

Résumé

De 1983 à 1985, l'Institut national de recherche en hydrologie en coopération avec Énergie atomique du Canada Ltée, a entrepris des recherches hydrogéologiques dans la zone de recherches du lac East Bull, un pluton de gabbro-anorthosite, située près de Massey en Ontario. Le présent rapport porte sur la méthodologie, les résultats et l'interprétation des recherches par sondage accomplies au lac East Bull pour mesurer les paramètres hydrogéologiques fondamentaux, à savoir la conductivité hydraulique, la hauteur piézométrique et la chimie de l'eau souterraine. Ces paramètres ont été mesurés dans quatre forages profonds (440 à 850 m de profondeur) et 14 forages peu profonds (40 à 100 m de profondeur) par diverses méthodes d'essai, de contrôle et d'échantillonnage mises au point pour servir dans des sondages ouverts et des sondages équipés de packers et de tubages pour packers multiples. Les résultats des recherches par les sondages sont interprétés dans le contexte d'un système régional d'écoulement d'eau souterraine pour la région du lac East Bull.

Les sondages ont démontré clairement que la conductivité hydraulique du gabbro-anorthosite diminue avec la profondeur d'une valeur moyenne près de la surface de 10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ à moins de 10^{-12} $m \cdot s^{-1}$ sous 400-500 m. En plus de cette tendance générale de la conductivité hydraulique en fonction de la profondeur, il y a plusieurs zones de fractures perméables qui ont joué un rôle important dans l'évolution des systèmes d'écoulement locaux et régionaux plus profonds. Les discontinuités structurales 050 et 130 sont particulièrement importantes sur le plan hydrogéologique; il s'agit de fractures associés à la base du troctolite et à un dyke porphyritique près du contact avec la base du pluton et de la faille régionale du lac Folson.

La chimie de l'eau souterraine dans les 300 m supérieurs du pluton est de type Ca/HCO_3 aux faibles profondeurs près des zones de recharge des eaux souterraines et passe à des pH élevés, avec de l'eau de type Na/HCO_3 le long de la direction de l'écoulement. L'évolution chimique est le résultat de réactions d'échange d'ions sur les minéraux de remplissage des fractures et n'est pas contrôlée par la composition de la masse rocheuse. Des eaux salines (Na/Cl) se trouvent sous 400 m dans le réseau d'écoulement régional profond. Le rapport Br/Cl de l'eau saline indique qu'elle provient d'une infiltration ancienne d'eau de mer ou d'eau de formation, ou d'un écoulement latéral venu de formations métasédimentaires précambriennes adjacentes.

La teneur en $\delta^{18}O$ des eaux souterraines du lac East Bull varie de façon remarquable de 7.6 ‰. Les eaux souterraines isotopiquement les moins denses sont celles qui contiennent du Na/HCO_3 et qui se trouvent dans le troctolite de la partie nord-est du pluton. Elles semblent contenir de l'eau de fonte glaciaire. Les eaux salines, contenant du Na/Cl, ont une composition isotopique semblable à celles de l'eau souterraine contemporaine et peu profonde dans le pluton, ce qui indique qu'elles ont une origine différente et font partie d'un système d'écoulement différent que ceux des eaux isotopiquement moins denses contenant du Na/HCO_3.

Abstract

In the period 1983-1985, the National Hydrology Research Institute in co-operation with Atomic Energy of Canada Limited undertook hydrogeological research studies at the East Bull Lake research area, a gabbro-anorthosite pluton located near Massey, Ontario. This report describes the methodology, results and interpretation of the borehole investigations completed at East Bull Lake to measure the fundamental hydrogeological parameters of hydraulic conductivity, hydraulic head and ground-water chemistry. These parameters were measured in four deep boreholes (440-850 m in depth) and 14 shallow boreholes (40-100 m in depth) using a variety of testing, monitoring and sampling methods developed for use in open boreholes and in boreholes equipped with packer assemblies and multiple-packer casings. The results of the borehole investigations are interpreted in the context of a regional ground-water flow system for the East Bull Lake area.

The borehole investigations reliably demonstrate that the hydraulic conductivity of the gabbro-anorthosite decreases with depth from an average near-surface value of 10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ to less than 10^{-12} $m \cdot s^{-1}$ below 400-500 m. Superimposed on this general hydraulic conductivity-depth trend are several permeable fracture zones which are shown to be important to the development of both local and deeper regional flow systems. Of particular hydrogeological significance are the 050 and 130 structural discontinuities, fracturing associated with the base of the troctolite unit and with a porphyritic dyke near the basal contact of the pluton and the regional-scale Folson Lake Fault.

The ground-water chemistry in the upper 300 m of the pluton is the Ca/HCO_3 type at shallow depths near ground-water recharge areas which evolves to high pH, Na/HCO_3 water along the direction of flow. The chemical evolution is the result of ion exchange reactions on fracture infilling minerals and is not controlled by the bulk rock composition. Saline, Na/Cl waters are present below about 400 m in the deep, regional flow system. The Br/Cl ratio of the saline water suggests that it is derived from an ancient infiltration of sea water, formation water or from lateral flow from adjacent Precambrian metasedimentary formations.

The East Bull Lake ground waters exhibit a remarkable range in $\delta\ ^{18}O$ of 7.6 ‰. The isotopically lightest ground waters are Na/HCO_3 waters found in the troctolite in the northeastern region of the pluton. A glacial meltwater component appears to be present in these waters. The saline Na/Cl waters have an isotopic composition similar to that of the modern, shallow ground water in the pluton, indicating they have a different origin and are part of a different flow system than the isotopically light Na/HCO_3 waters.

Remerciements

Les auteurs remercient sincèrement les personnes suivantes pour leur contribution au projet du lac East Bull : J. Gorrie, Énergie atomique du Canada Ltée (EACL), pour les essais et les échantillonnages dans les sondages, J. Ross, EACL, pour l'échantillonnage de l'eau souterraine; K. Inch, Institut national de recherche en hydrologie INRH, pour l'analyse chimique en laboratoire des eaux souterraines; E. Kozak, EACL, et K.S. Novakowski, INRH, pour l'installation des tubages pour plusieurs packers dans les sondages; R. Dickin, Gartner Lee et associés pour l'installation des packers à injection pour puits de production; et S. Denhoed, D. Hutchinson, M. Jensen, B. Kueper, P. Kornelsen, P. Lapcevic, I. MacDonald, C. Van der Grient et A. Vorauer, tous de l'EACL, pour leur aide compétente dans tous les aspects des recherches hydrogéologiques entreprises au lac East Bull.

Nous tenons aussi à remercier tout spécialement R. Pearson et M. Gascoyne, EACL, pour avoir coordonné l'étude du lac East Bull.

Introduction

L'Énergie atomique du Canada Limitée (EACL) évalue actuellement le principe de l'évacuation en profondeur des déchets du cycle du combustible nucléaire dans des formations rocheuses géologiquement stables. Dans cette phase d'évaluation d'une durée de dix ans (1981-1990), l'EACL doit fournir des données géologiques et hydrogéologiques caractéristiques de roches plutoniques du Bouclier canadien. Depuis 1977, l'Institut national de recherche en hydrologie (INRH) d'Environnement Canada, en conjonction avec l'EACL, a dirigé un programme de recherche pour examiner et mettre au point des méthodes permettant de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques des roches plutoniques fracturées dans plusieurs sites ou zones de recherche dans le Bouclier canadien. Ce programme de recherche a pour but d'obtenir des mesures fiables sur l'écoulement, la chimie et les propriétés de transport en soluté des eaux souterraines des roches plutoniques fracturées jusqu'à 1000 m de profondeur.

En 1983, l'INRH a commencé des études hydrogéologiques dans la zone de recherche RA-7 du lac East Bull (LEB) situé près de Massey en Ontario. En 1983, des études de reconnaissance hydrogéologique ont été faites dans quatre sondages au diamant profonds (série LEB) et quatorze sondages à percussion peu profonds (série P). Raven et coll. (1984) ont résumé les résultats de ces études qui comprenaient le marquage des eaux de forage, les essais avec packers, les essais de pompage, l'installation de packers d'injection-production et l'échantillonnage de l'eau souterraine.

Les essais et les contrôles hydrogéologiques ont eu lieu dans la zone de recherche du lac East Bull en 1984 et 1985. Des séries de sondages LEB et P, on a obtenu durant cette période des mesures détaillées de la conductivité hydraulique, de la hauteur piézométrique et de la chimie de l'eau.

Les essais hydrogéologiques systématiques avec packer simple et avec packer composé de deux éléments dans les sondages de la série P en 1984 et 1985 visaient à déterminer la distribution de la conductivité hydraulique et de la hauteur piézométrique. Des échantillons d'eau souterraine ont aussi été prélevés dans des sections isolées par packers de chaque sondage de la série P pour caractériser la composition chimique et isotopique des eaux souterraines de LEB près de la surface (0 à 100 m).

En 1984, des essais hydrogéologiques ont été faits dans les sondages profonds LEB-1,2 et 4 avec des packers d'injection-production (PIP) qui ont été installés dans les sondages en octobre et novembre 1983, établissant ainsi un réseau de 14 sections d'essai dans les trois sondages. Cela a permis de limiter le mélange des eaux souterraines dû aux hauteurs piézométriques différentes le long de chaque sondage. La conductivité hydraulique et la hauteur piézométrique ont été mesurées dans chaque section isolée par des PIP. Des échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans chaque section pour déterminer la composition chimique et isotopique des eaux souterraines LEB jusqu'à des profondeurs de 600 à 800 m.

En octobre et novembre 1984, des tubages à plusieurs packers ont été installés de façon permanente dans les sondages LEB-1, 2, 3 et 4. Des essais de conductivité hydraulique, un contrôle détaillé de la hauteur piézométrique et un échantillonnage de l'eau souterraine ont eu lieu en 1985 avec ces tubages.

Le présent rapport résume les résultats des essais, du contrôle et de l'échantillonnage hydrogéologique effectués dans les sondages de la zone de recherche du lac East Bull en 1983, 1984 et une partie de 1985. Certains résultats isotopiques et données sur les hauteurs piézométriques obtenus après octobre 1985 n'ont pu être inclus dans le rapport. Les données hydrogéologiques disponibles de 1983, 1984 et 1985 sont interprétées dans le contexte d'un système régional d'écoulement des eaux souterraines dans la zone du lac East Bull.

Description de l'emplacement

SITUATION DE L'EMPLACEMENT

La zone de recherche du lac East Bull est située dans le district régional ontarien d'Algoma, à 35 km à l'est d'Elliot Lake, au nord de la route 17, entre Sault-Ste-Marie et Sudbury (figure 1). On peut y accéder par une route gravelée (Ontario, route 553) qui se termine plus au nord, à environ 35 km de Massey. Leech et Cooper (1982) ont décrit les caractéristiques locales et régionales du terrain. La topographie régionale et la distribution des eaux superficielles sont représentées dans la figure 2.

Tous les sondages ont été faits dans une zone de 3 à 4 km^2 choisie dans le cadre d'une étude géologique et hydrogéologique détaillée (Ermanovics et coll., 1982). Cette zone d'étude détaillée est située immédiatement au nord-ouest du lac Moon entre les lacs East Bull et Folson (figure 1). La zone étudiée est de plus située sur un plateau (altitude dépassant 380 m au-dessus du niveau de la mer) dans la partie centrale du pluton du lac East Bull. La topographie de la zone étudiée et l'emplacement des sondages sont représentés dans la figure 3.

RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Deux grands axes de drainage (figure 2) relient le plateau d'étude à la rivière aux Sables qui coule vers le sud jusqu'au lac Huron. Deux cours d'eau confluents drainent la moitié nord du plateau en suivant deux importants alignements structuraux. Ces cours d'eau se déversent dans le lac Little Bull, par un cours d'eau provenant du lac Moon. Le drainage du lac Moon se fait vers l'ouest jusqu'au lac Burnett, puis vers le nord et l'est jusqu'à la rivière aux Sables. Le bassin hydrographique de la moitié sud du plateau est drainé vers le sud et le sud-est jusqu'au lac Moon et la dépression topographique créée par la faille régionale du lac Folson (voir ci-après). Les eaux de drainage sont canalisées le long de la faille du lac Folson en direction du sud-est vers le lac Parisien jusqu'à la rivière aux Sables.

GÉOLOGIE

La majorité des travaux géologiques et géophysiques effectués jusqu'à maintenant dans la zone de recherche du lac East Bull ont été limités à la partie centrale formant le plateau de la masse de gabbro-anorthosite du lac East Bull (Ermanovics et coll., 1983). La géologie de surface de cette zone centrale est décrite en détail par Kamineni et coll. (1984) (figure 4), McCrank et coll. (1983), et James et Born (1985). More et Armstrong (1943), Born (1978), Born et James (1978), et Brown et Kamineni (1981) ont cartographié cette région. La géologie superficielle de la zone centrale, déterminée à l'aide des diagraphies des sondages de la série LEB est décrite en détail par McCrank et coll. (1984) et par Ejeckam et coll. (1984). Des levés de reconnaissance géophysique, aériens et au sol, notamment des levés gravimétriques (Watson 1982, Redford 1983a), aéromagnétiques et des EM VLF aériens (Redford 1983b) ont servi à déterminer la géologie et l'emplacement généraux des principales discontinuités structurales.

Les résultats des levés et des travaux de cartographie susmentionnés indiquent que la zone du plateau est la partie centrale d'une intrusion litée de gabbro-anorthosite qui est de forme elliptique et qui mesure 13 km sur 4 km. Le pluton, qui est probablement de l'ère Protérozoïque, est une intrusion litée en forme de cuvette peu profonde (700 à 800 m de profondeur), avec des roches anorthosiques à la base et des roches gabbroïques près du sommet. Dans la zone cartographiée (figure 4), le pluton repose sur des roches gneissiques, des granodiorites et des roches métavolcaniques de l'Archéen.

Le pluton de gabbro-anorthosite a été subdivisé selon sa texture et sa composition en huit unités qui reflètent les pourcentages de pyroxène, d'amphibolite, de plagioclase et la stratification suivant la composition. McCrank et coll. (1983), et Kamineni et coll. (1984) donnent une description détaillée de ces unités. Les roches dans la zone étudiée ont été aussi pénétrées par de nombreux dykes et feuilles d'amphibolite et de diabase du Protérozoïque. Ces nombreux dykes ont une direction générale nord-ouest à travers la zone du plateau et sont représentés à la figure 4.

Les principales discontinuités structurales ou alignements structuraux ont aussi été cartographiés en détail à l'aide de photographies aériennes à l'échelle locale ou

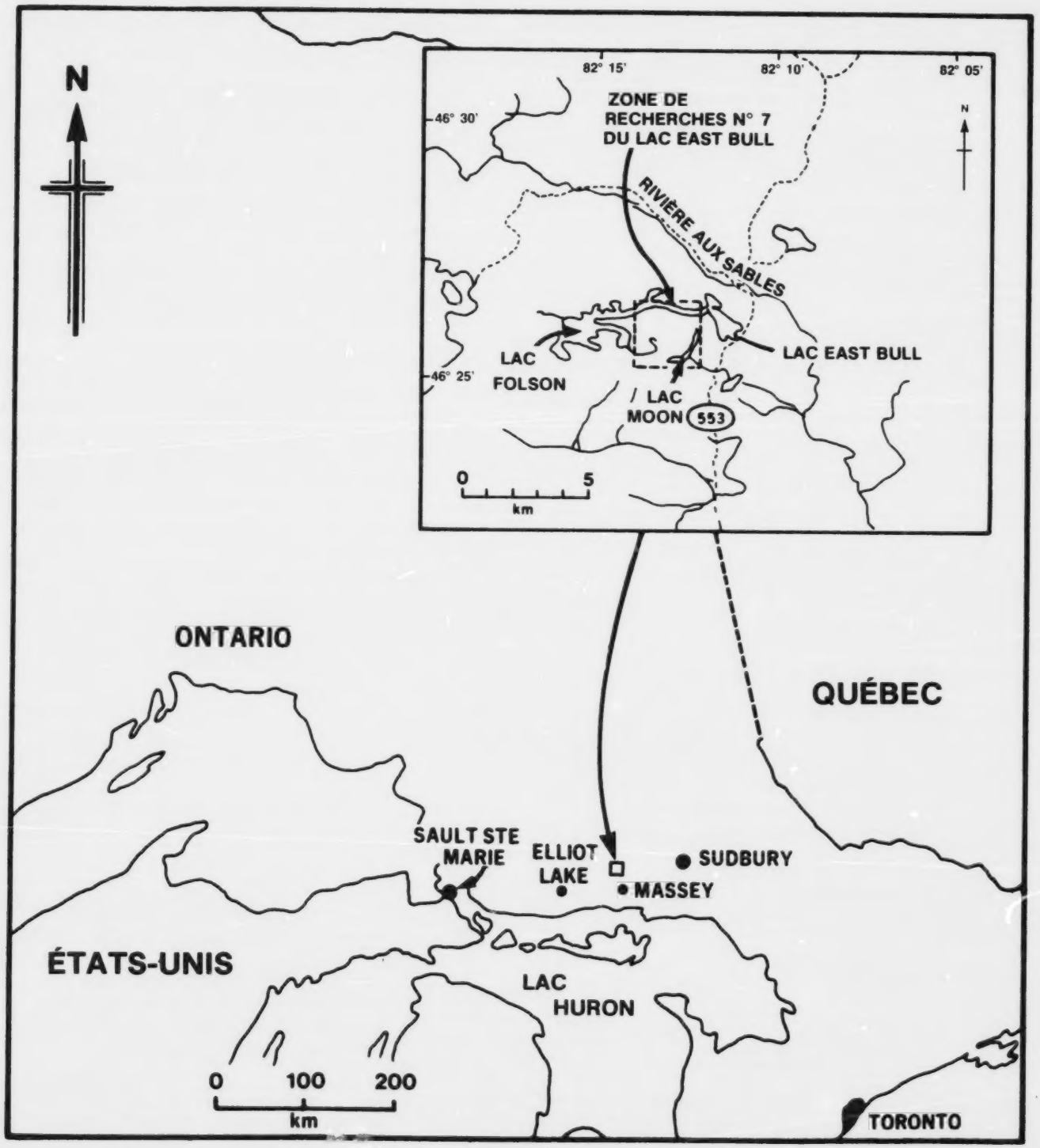

Figure 1. Carte situant la zone de recherche du lac East Bull.

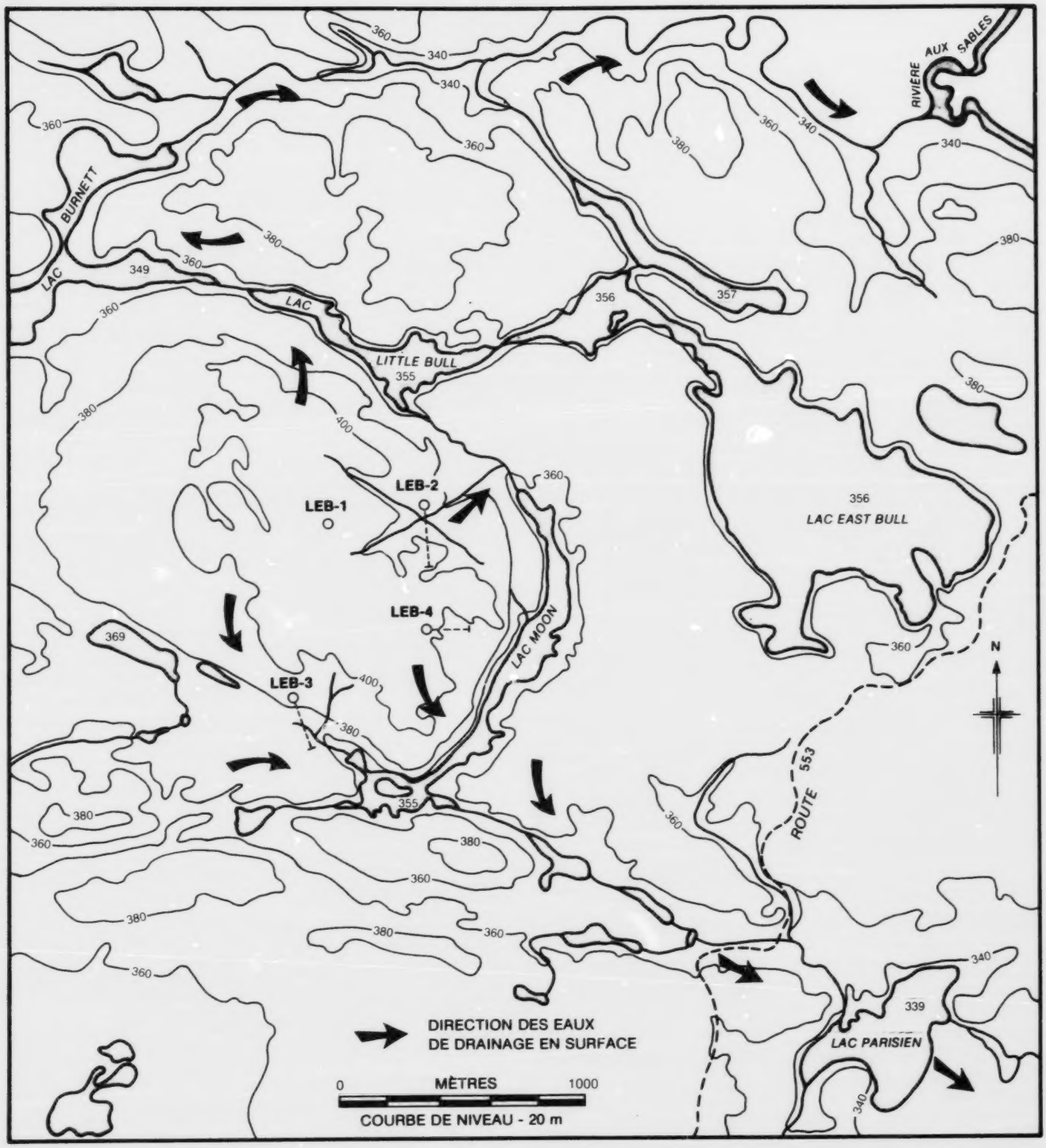

Figure 2. Topographie et réseau hydrographique régionaux de la zone de recherche du lac East Bull.

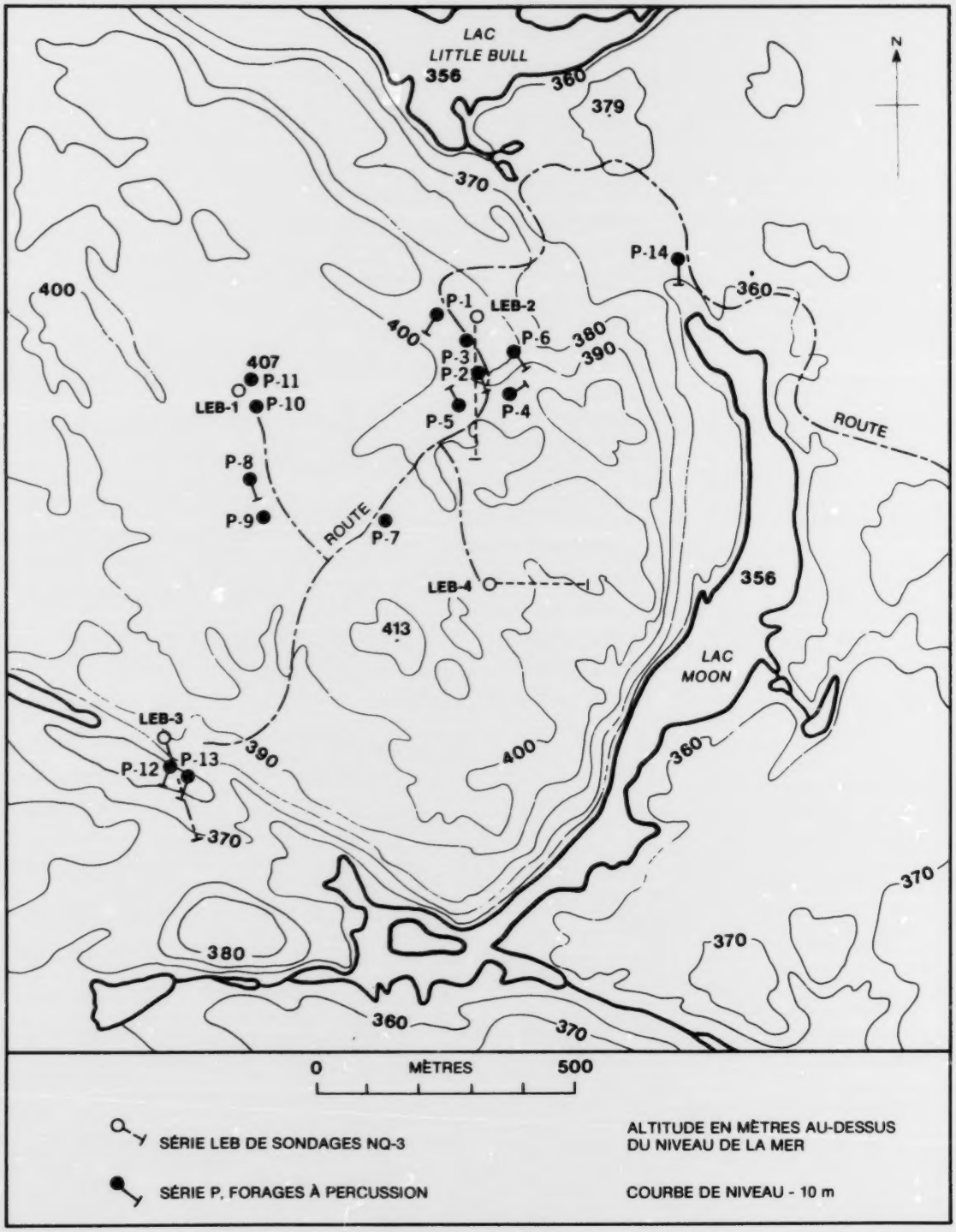

Figure 3. Topographie et emplacement des sondages dans la zone d'étude immédiate, zone de recherche du lac East Bull.

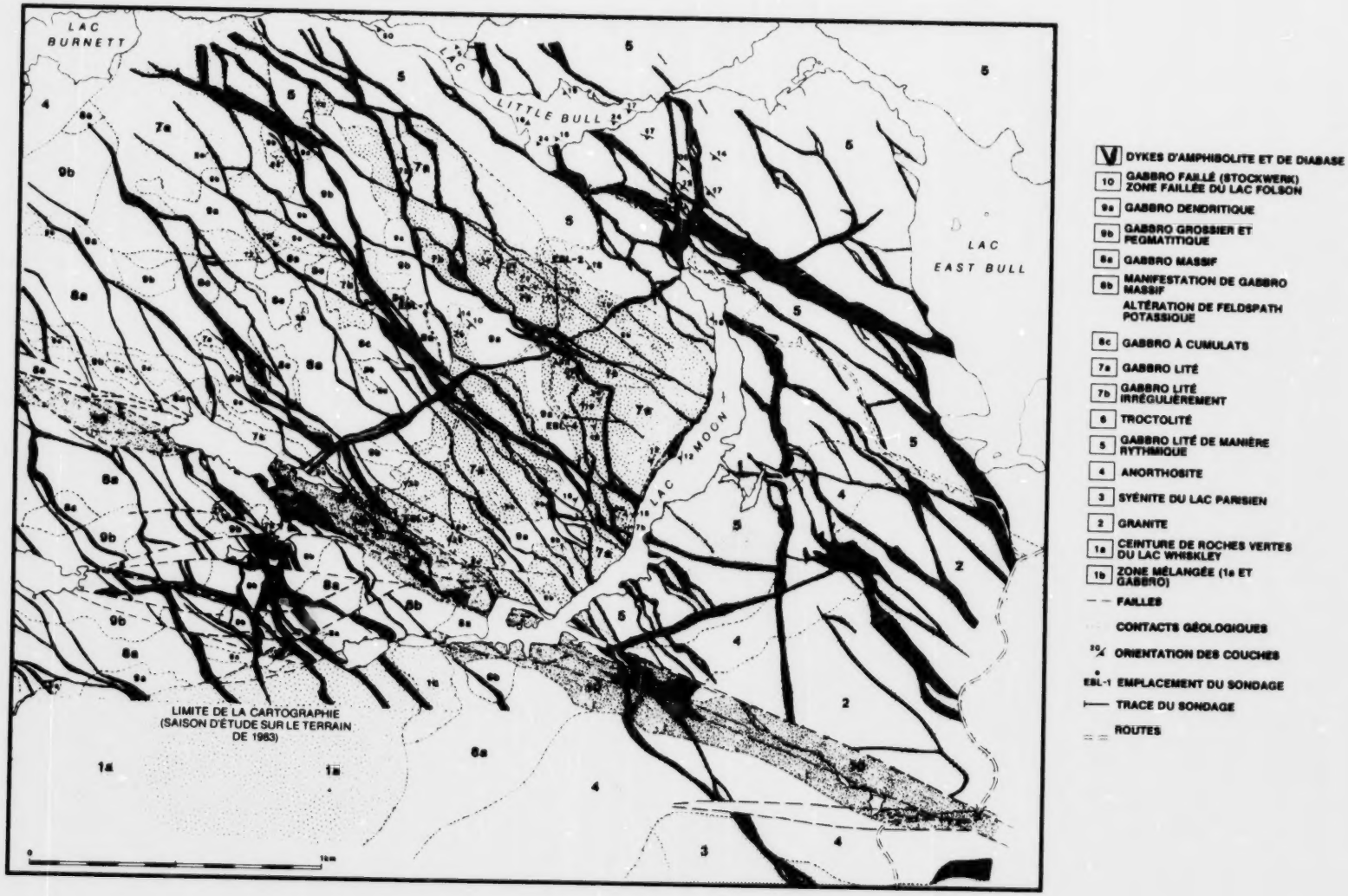

Figure 4. Géologie du plateau central du pluton du lac East Bull (d'après Kamineni et coll., 1984).

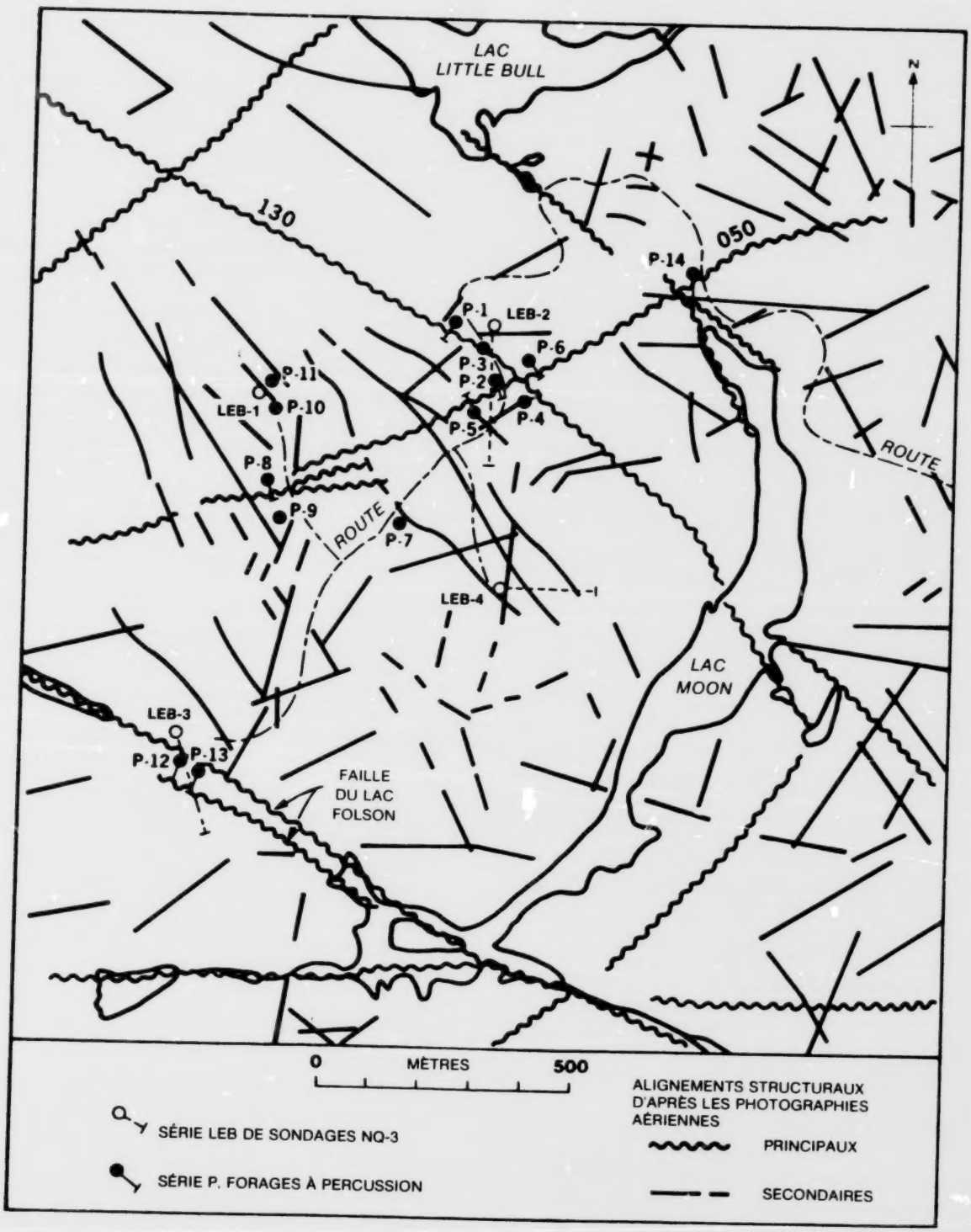

Figure 5. Emplacement des sondages et alignements structuraux identifiés par photographies aériennes dans la zone d'étude, zone de recherche du lac East Bull.

régionale. Il est important dans les recherches sur l'écoulement des eaux souterraines d'identifier les principales zones de fractures et les failles car ces discontinuités peuvent constituer des raccourcis de forte perméabilité, ou encore des barrières de faible perméabilité dans une roche uniformément fracturée et perméable par ailleurs. La carte des alignements structuraux identifiés sur les photos aériennes est donnée à la figure 5. Les alignements tant secondaires que principaux ont été identifiés; ces derniers dépassent généralement 1 km de long et coupent la zone supérieure du plateau.

Trois alignements structuraux identifiés dans la figure 5 sont particulièrement importants : le 050, le 130 et celui de la faille du lac Folson. Les alignements 050 et 130 qui se croisent dans la partie nord de la zone du plateau sont aquifères près de la surface selon des levés de thermographie aérienne réalisés au printemps 1983 (D. Lee, communication personnelle). Ces alignements canalisent les eaux de drainage de surface et, probablement, les eaux souterraines de la moitié nord de la zone du plateau en direction nord vers le lac Little Bull.

La comparaison entre la carte des alignements et la carte géologique révèle que l'alignement 130 est associé à un dyke mafique de direction nord-ouest, à très fort pendage vers le nord. Il se peut que l'alignement 050 ne soit pas associé aux dykes mafiques; il est donc probablement associé à une vaste zone fracturée ou à une faille. Comme le montre la figure 5, on a effectué sur les alignements des forages au diamant profonds et des forages à percussion peu profonds pour créer un réseau de sondages hydrogéologiques. Les résultats du programme de forage (Raven et coll., 1984) indiquent que les deux alignements ont un fort pendage vers le nord.

Les alignements de la faille du lac Folson gisent dans une grande faille d'échelle régionale qui traverse la zone étudiée en direction du nord-ouest. Des ramifications de cette rupture faillée sont recoupées par les sondages LEB-3, P-12 et P-13.

Programme de forage

Le programme de forage du lac East Bull en 1983 a consisté en quatre forages au diamant profonds et 14 forages à percussion peu profonds, totalisant des longueurs de 2617 m et 740 m respectivement. Les forages au diamant ont été supervisés par la Commission géologique du Canada; les forages à percussion ont été supervisés par l'INRH. Le tableau 1 résume les résultats du programme de forage. Le tableau 2 donne les coordonnées relatives des forages et l'altitude des tubages en surface tels que déterminées par l'étude. Les figures 3 et 5 indiquent l'emplacement des forages.

Les résultats du programme de forages au diamant sont présentés et analysés en détail par Ejeckam et coll. (1984) et par Raven et coll. (1984). Les résultats du programme de forages à percussion sont résumés par Raven et coll. (1984). Les coupes lithologiques et structurales détaillées établies par Ejeckam et coll. (1984) pour les sondages LEB-1, 2, 3 et 4 sont données dans les figures 6 à 9.

Tableau 1. Longueur et orientation des sondages

Sondage	Longueur (m)	Orientation
Série LEB		
NQ – au diamant		
LEB-1	850.7	Verticale
LEB-2	835.6	177°/75-71°*
LEB-3	441.6	161-159°/60-57°
LEB-4	488.7	91-95°/69-65°
Série P		
Diamètre : 0.16 m. À percussion		
P-1	53.3	210°/68°
P-2	38.1	148°/75°
P-3	38.1	Verticale
P-4	55.0	0°/65°
P-5	97.6	320°/70°
P-6	68.0	140°/80°
P-7	39.6	Vertical
P-8	45.2	160°/68°
P-9	43.2	Verticale
P-10	98.7	Verticale
P-11	49.2	Verticale
P-12	48.6	210°/75°
P-13	48.7	194°/65°
P-14	43.3	184°/70°

* Plage d'orientations entre la tête et le fond du sondage telle que déterminée à partir des levés gyroscopiques de direction de Sperry Sun of Canada.

Tableau 2. Coordonnées relatives des sondages et altitude des tubages en surface

Sondage	Coordonnées		Altitude du tubage en surface*
	Ordonnée (m)	Abscisse (m)	
LEB-1	42 523.17	6421.72	405.85
LEB-2	42 661.89	6877.85	397.76
LEB-3	41 859.42	6314.96	386.71
LEB-4	42 713.84	6878.68	404.54
P-1	42 676.04	6807.86	395.08
P-2	42 568.38	6884.36	391.29
P-3	42 621.11	6852.81	390.78
P-4	42 537.99	6925.11	393.13
P-5	42 489.20	6824.64	396.40
P-6	42 613.70	6941.14	399.67
P-7	42 349.19	6721.04	403.18
P-8	42 365.71	6449.80	401.02
P-9	42 306.28	6474.94	401.51
P-10	42 496.84	6443.14	405.42
P-11	42 536.04	6429.95	405.56
P-12	41 810.55	6330.29	378.36
P-13	41 807.89	6334.48	378.47
P-14	42 806.18	7285.23	362.92

* L'altitude repère est celle du point le plus bas de la tête du tubage du sondage; en mètres au-dessus du niveau de la mer.

En plus des coupes structurales et lithologiques, des diagrammes par image acoustique et un choix de coupes géophysiques ont été établis dans les sondages de la série LEB par la Commission géologique du Canada et la Commission géologique des États-Unis. Des levés par image acoustique ont été faits pour quelques sondages de la série P par la Commission géologique du Canada.

D'après les travaux d'Ejeckman et coll. (1984) et de la Commission géologique du Canada, Raven et coll. (1984) ont résumé les principaux éléments géologiques recoupés par chaque sondage de la série LEB (voir ci-après). Ces résumés complètent les données hydrogéologiques présentées dans les chapitres 4, 6 et 7. Dans ce rapport, la profondeur s'entend de la longueur du sondage depuis le sommet du tubage de surface.

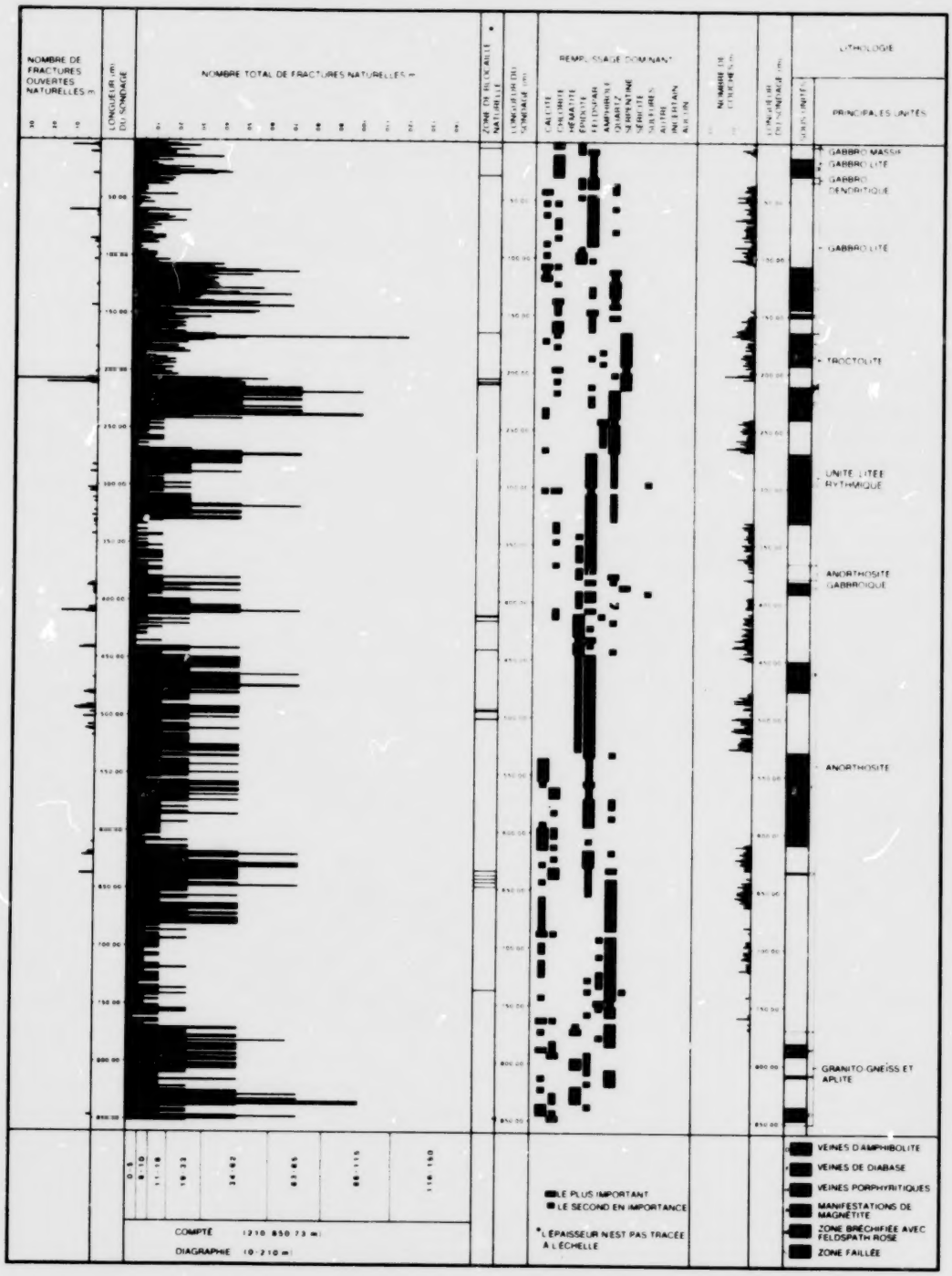

Figure 6. Coupe lithologique et structurale sommaire du sondage LEB-1 (d'après Ejeckam et coll., 1984).

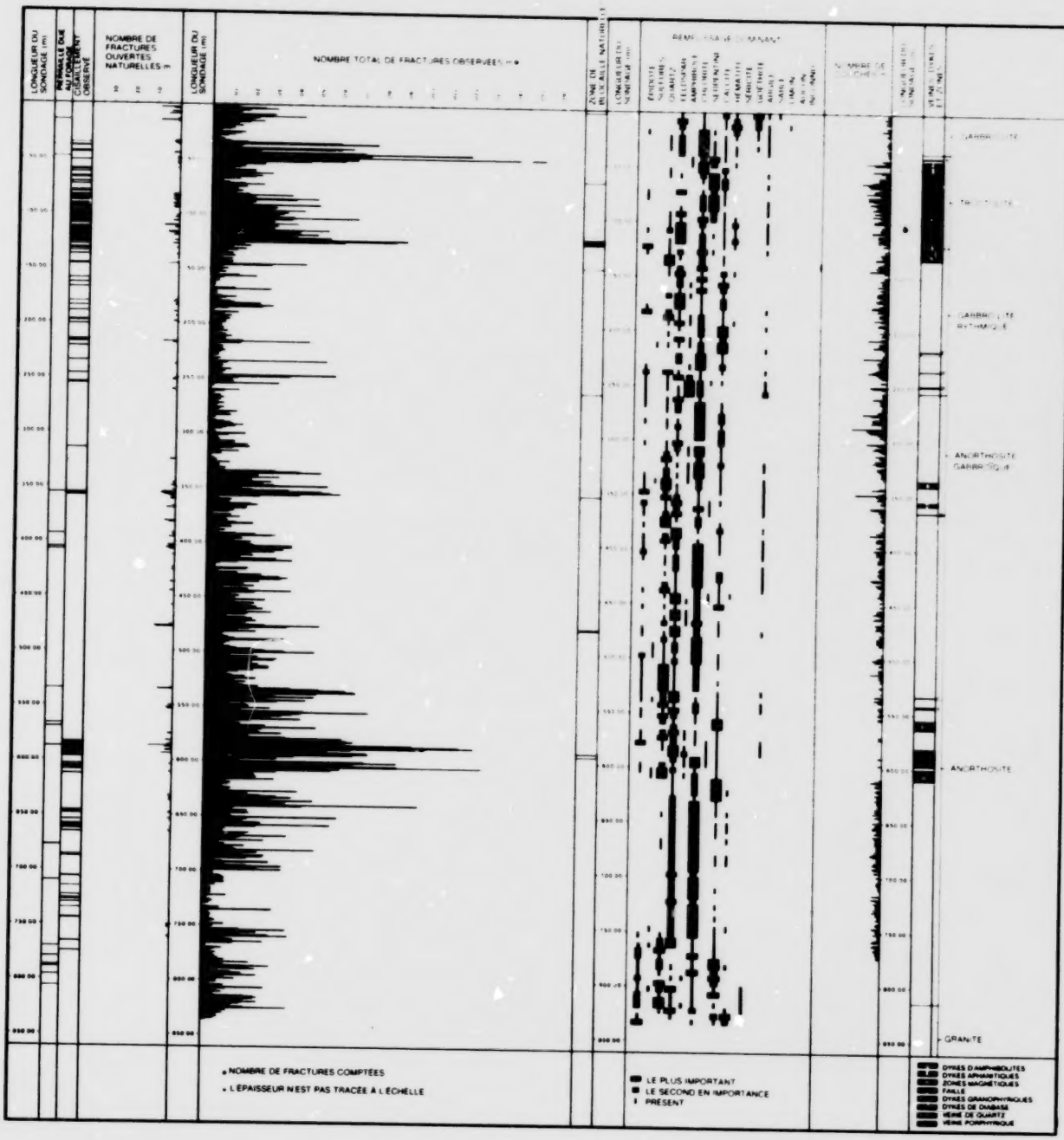

Figure 7. Coupe lithologique et structurale sommaire du sondage LEB-2 (d'après Ejeckam et coll., 1984).

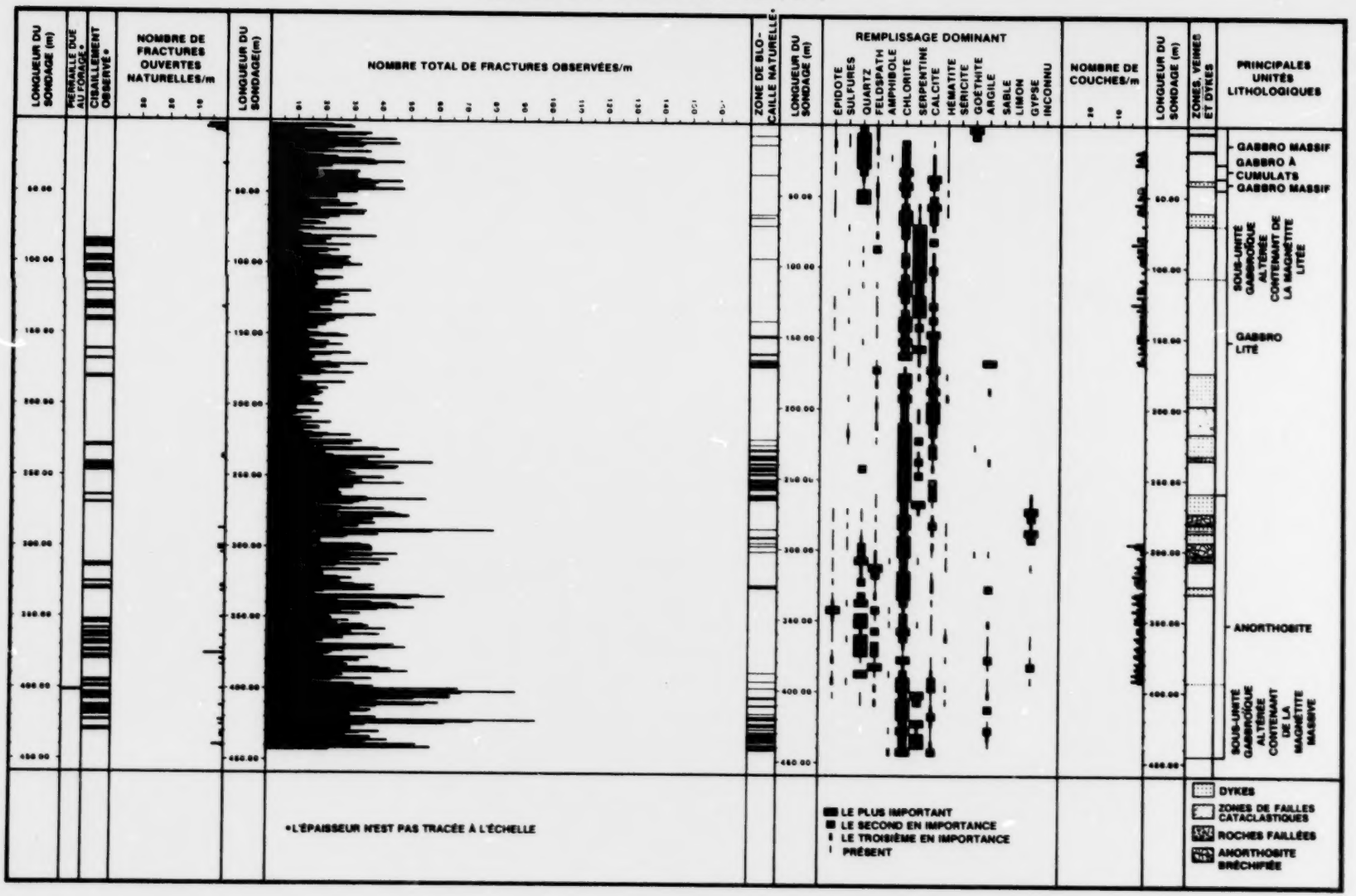

Figure 8. Coupe lithologique et structurale sommaire du sondage LEB-3 (d'après Ejeckam et coll., 1984).

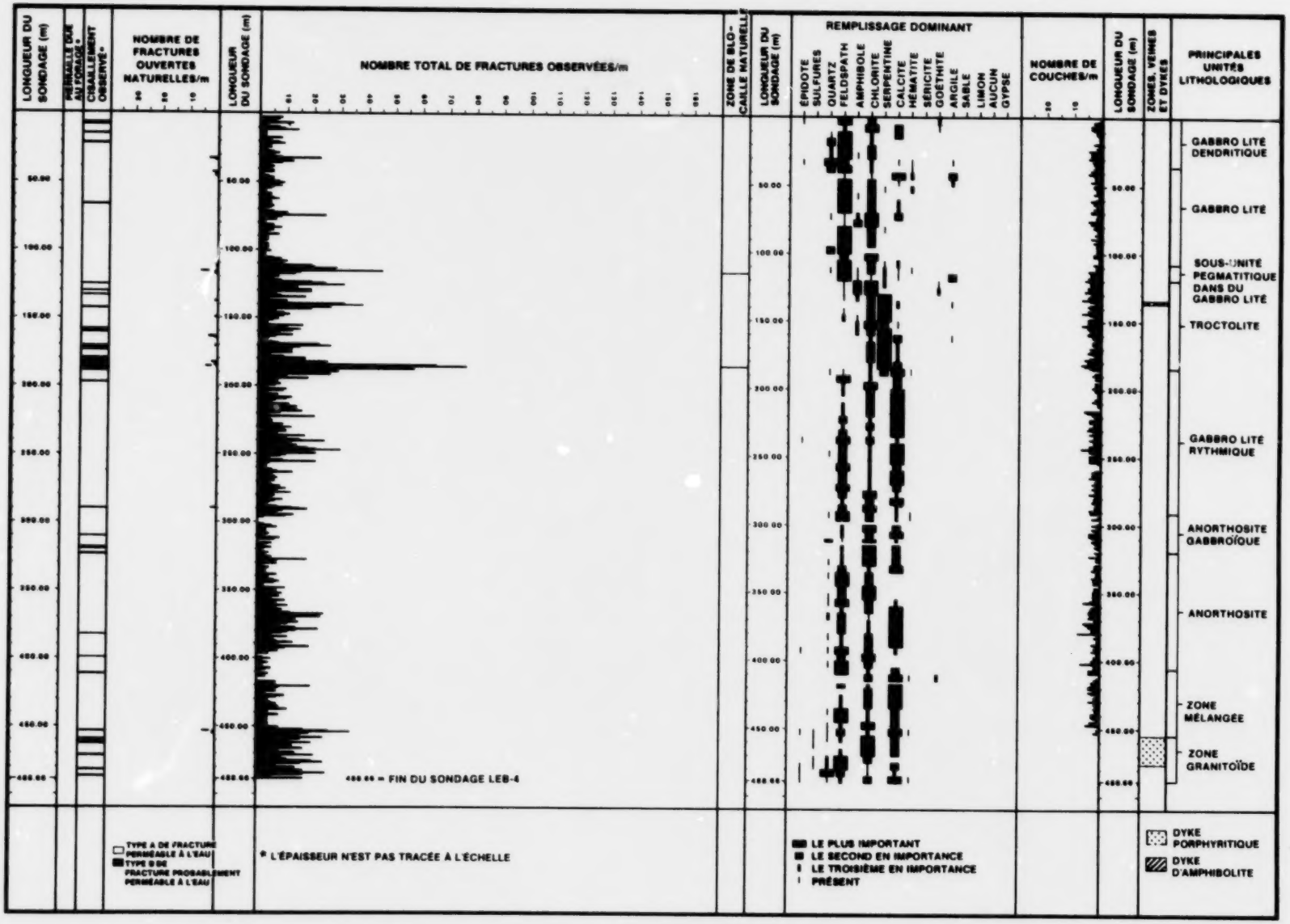

Figure 9. Coupe lithologique et structurale sommaire du sondage LEB-4 (d'après Ejeckam et coll., 1984).

Le sondage LEB-1 a été foré dans une zone où on ne pouvait déceler en surface de failles ou de zones de fractures importantes. On a situé le sondage de façon à pouvoir vérifier l'interprétation de données gravimétriques indiquant que la zone sous le sondage LEB-1 était la partie la plus épaisse du pluton. D'après les diagrammes de forage et les levés par image acoustique, le sondage LEB-1 a recoupé plusieurs zones de fractures ouvertes à des profondeurs d'environ 65, 87, 210, 410, 440, 475, 490, 510, 620 et 640 m. La roche granitique du socle a été recoupée à 770 m de profondeur. L'élément hydrogéologique le plus important recoupé par le sondage LEB-1 est la zone de fractures associée à la base d'une couche riche en magnétite et non magnétique par endroits de troctolite serpentinisé à 210 m de profondeur. Des filons-couches et des dykes d'amphibolite et de diabase ont été recoupés aussi sur de longues sections du sondage LEB-1.

Les sondages LEB-2 et LEB-3 visaient à étudier la géologie et l'hydrogéologie des principaux alignements et failles décelés par les photos aériennes. Le sondage LEB-2 a recoupé les alignements 130 et 050 à 110-126 m et 355 m de profondeur probable ainsi que la roche granitique du socle à environ 814 m. D'après les diagrammes de forage et les diagrammes par image acoustique du sondage LEB-2, des zones de fractures ont été recoupées à 35, 60, 123, 216, 250, 355, 405, et 580 m de profondeur. L'horizon de troctolite a été recoupé de 51 à 122 m de profondeur.

Le sondage LEB-3 visait à recouper des roches très fracturées et extrêmement altérées associées aux failles du lac Folson. La principale zone faillée a été recoupée entre 197 et 220 m de profondeur et quelques zones associées de cisaillements et de fractures ont été recoupées sur toute la longueur du sondage. Les diagrammes par image acoustique et les diagrammes de forage ont révélé la présence de fractures ouvertes à 10, 237, 300, 374 et 400 m de profondeur. Le sondage LEB-3 a été achevé à 442 m à cause de la mauvaise qualité de la roche.

Le sondage LEB-4 visait à étudier la géologie et l'hydrogéologie d'une zone relativement peu fracturée, révélée par l'analyse des alignements sur les photos aériennes. Le sondage a une orientation approximativement normale par rapport à la direction des couches de gabbro-anorthosite. L'horizon repère de troctolite a été recoupé entre 119 et 184 m de profondeur. De même que dans le sondage LEB-1, on peut observer à la base de l'horizon de troctolite une fracturation marquée. En plus de cette zone, on a observé des fractures ouvertes à 50, 60, 115 et 454 m de profondeur. Un contact granitique basal a peut-être été recoupé à environ 476 m de profondeur.

Essais de conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique a été mesurée dans les sondages des séries P et LEB tant à découvert qu'avec des packers simples et des packers doubles. Ce chapitre résume les méthodes, les résultats et les interprétations de tous les essais effectués dans les sondages du lac East Bull pour mesurer la conductivité hydraulique du pluton de gabbro-anorthosite. La méthode, les résultats et l'interprétation des essais d'hydraulique sont donnés séparément pour les sondages de la série P et ceux de la série LEB.

SONDAGES DE LA SÉRIE P

En 1983, dans tous les sondages de la série P, on a fait des essais de pompage à découvert. Les résultats de ces essais, exprimés en termes de transmissivité et de capacité d'emmagasinage, sont résumés par Raven et coll. (1984). En 1984, des essais avec des packers simples et des packers doubles ont été faits dans le cadre d'un programme de recherche pour déterminer la distribution de la transmissivité et de la conductivité hydraulique dans les sondages de la série P. Ce programme a aussi permis d'identifier des zones fracturées très perméables en vue de l'échantillonnage des eaux souterraines (voir chapitre 7).

Méthode

Essais de pompage dans des sondages à découvert

La méthodologie utilisée dans les essais de pompage à découvert pour la série P est décrite par Raven et coll. (1984).

Essais à packers

Des essais détaillés ont été faits dans les sondages de la série P, en 1984, avec des packers simples et des packers doubles. Il s'agissait d'essais d'écopage-rétablissement (Hvorslev, 1951). On contrôle le rétablissement ou la réponse transitoire d'une section d'essai à un prélèvement ou écopage d'eau instantané, afin de déterminer la transmissivité et la capacité d'emmagasinage du milieu.

Des essais d'écopage-rétablissement systématiques à l'aide de packers doubles ont été faits, par section de 4.0 m de longueur, dans chaque sondage de la série P, allant de la nappe phréatique jusqu'au fond du sondage. Des essais semblables avec des packers simples ont été faits seulement lorsque d'importantes fuites de fluide se produisaient autour des packers à deux éléments parce que la roche était très fracturée ou que la paroi du sondage était irrégulière. On a compté 128 essais d'écopage-rétablissement qui ont été réussis dans les sondages de la série P.

Au cours de chaque essai avec packer à deux éléments, le packer de sondage (figure 10) est descendu jusqu'à la section d'essai à l'aide d'un treuil à main et d'un trépied. Le packer de sondage à deux éléments est composé de deux packers en caoutchouc renforcés d'acier de 1.0 m de long et d'un tuyau de séparation perforé de longueur variable. Il est couplé à une colonne montante en plastique qui communique avec la section d'essai par le mandrin creux

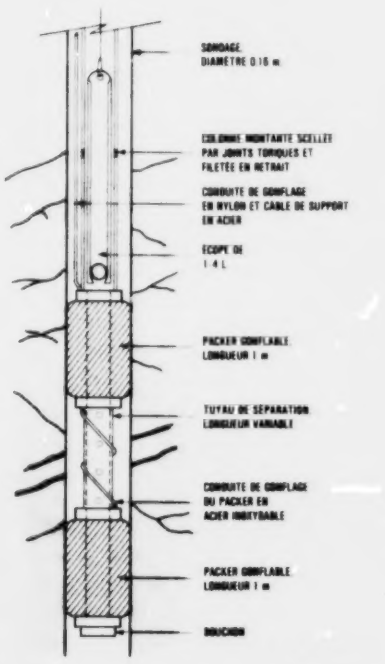

Figure 10. Schéma du packer double de sondage utilisé dans les essais d'écopage-rétablissement pour les sondages de la série P.

du packer supérieur. La colonne montante est constituée de tuyaux en PVC de 3.05 m de long, filetés en retrait et scellés par des joints toriques. Elle mesure 52.2 mm de diamètre intérieur et 60.3 mm de diamètre extérieur.

Les packers sont gonflés à l'azote comprimée, à environ 1000 kPa de plus que les pressions du fluide ambiant. La pression dans le packer est contrôlée par un manomètre de Bourdon.

Les niveaux de fluide sont contrôlés après le gonflage du packer et avant le prélèvement d'un volume connu d'eau afin de déterminer un niveau d'équilibre du fluide dans la section d'essai. Les niveaux d'équilibre ou niveaux statiques sont mesurés habituellement à l'intérieur de périodes allant de plusieurs heures à quelques dizaines d'heures pour les sections d'essai ayant une conductivité hydraulique supérieure à environ 10^{-8} m·s^{-1}. Il faut allonger ces périodes (plusieurs jours à quelques semaines) pour établir le niveau d'équilibre dans des sections d'essai ayant une conductivité hydraulique inférieure à 10^{-8} à 10^{-9} m·s^{-1}. Pour simplifier les essais, on a supposé que les niveaux d'équilibre dans ces sections étaient égaux aux niveaux dans le sondage à découvert. Cette hypothèse est raisonnable car la durée moyenne des essais (c'est-à-dire plusieurs heures) est inférieure à la durée moyenne de maintien à découvert des sondages avant les essais (c'est-à-dire plusieurs mois).

Durant chaque essai d'écopage-rétablissement, 3 à 4 L d'eau étaient prélevés dans la colonne montante et le rétablissement du niveau du fluide y était contrôlé. Le prélèvement de 3 à 4 L d'eau abaissait instantanément le niveau d'environ 1.5 m. On a souvent eu recours à des écopages répétés dans les sections d'essai de faible perméabilité afin d'abaisser davantage le niveau et d'améliorer la limite inférieure des essais d'écopage-rétablissement. Étant données 1) la sensibilité du niveau du fluide (déterminée par l'équipement de mesure du niveau de l'eau) et 2) les limites de mesure du débit (déterminées à partir du diamètre de la colonne montante et de la durée de l'essai), la limite inférieure de l'essai d'écopage ne pouvait être améliorée qu'en abaissant davantage le niveau de l'eau dans la section d'essai. Les niveaux de fluide étaient contrôlés à l'intérieur et à l'extérieur de la colonne montante par un ruban limnimétrique à contacts électriques ayant une précision de ±5 mm. Les niveaux étaient contrôlés à l'extérieur de la colonne montante afin de détecter toute fuite de fluide par le joint d'étanchéité du packer supérieur. Plusieurs essais ont révélé des fuites; ces essais ont été pris en note (annexe A), mais ont été écartés de l'analyse. Avant les essais dans chaque sondage, on a mis le packer de sondage à deux éléments sous pression, en surface, dans un sondage artificiel constitué d'un tuyau en plastique pour vérifier son étanchéité.

Chaque essai réussi avec un packer double a été analysé par la méthode de la courbe type de Cooper et coll. (1967) pour déterminer un paramètre de transmissivité (T) de la forme suivante :

$$T = \frac{\tau r_s^2}{t} \qquad (1)$$

où τ et t sont les points de correspondance mesurés et r_s est le rayon de la colonne montante dans laquelle les niveaux sont mesurés. La conductivité hydraulique d'une masse rocheuse équivalente (K_{erm}) est donnée par le rapport de la transmissivité calculée à la longueur de la section d'essai (L) :

$$K_{erm} = T/L \qquad (2)$$

La plupart des essais dans des sections de faible conductivité hydraulique ($< 10^{-9}$ m·s^{-1}) ont révélé un rétablissement négligeable du niveau de fluide au cours de périodes d'observation de plusieurs dizaines d'heures. Pour ces sections d'essai, le débit par unité de charge hydraulique après prélèvement ($Q/\Delta H$) a été estimé à partir des débits dérivés de deux mesures successives du niveau du fluide ou de la limite de sensibilité du niveau (10 mm) pour un temps donné et à partir des charges hydrauliques après prélèvement, basées sur la différence entre le niveau moyen observé pendant l'essai et les niveaux de fluide dans le sondage à découvert. Les valeurs estimées de $Q/\Delta H$ ont été exprimées en termes de transmissivité en régime permanent selon la formule (Hvorslev, 1951)

$$T = \frac{Q}{\Delta H\, 2\pi} \ln (r_b/r_w) \qquad (3)$$

où r_b est le rayon d'une limite circulaire à pression constante (supposé égal à 10 m) et r_w est le rayon du sondage.

Les essais avec packer double accomplis dans les sondages de la série P ont révélé une transmissivité de l'ordre de 5×10^{-10} à 5×10^{-5} m^2·s^{-1}). Pour les sections d'essai de 4.0 m du lac East Bull, cela équivalait à une plage de conductivité hydraulique de la masse rocheuse d'environ 1×10^{-10} à 1×10^{-5} m·s^{-1}.

Résultats et interprétation

Les résultats des essais de pompage à découvert dans les sondages de la série P sont donnés par Raven et coll. (1984) et sont reproduits dans ce rapport dans le tableau 3. Ce tableau donne les mesures de transmissivité et de capacité d'emmagasinage dans les sondages à découvert.

Tableau 3. Propriétés hydrauliques des sondages à découvert de la série P

Sondage	Transmissivité ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Capacité d'emmagasinage
P-1	2×10^{-6}	10^{-7}
P-2	8×10^{-7}	10^{-7}
P-3	2×10^{-6}	10^{-7}
P-4	6×10^{-7}	10^{-6}
P-5	4×10^{-6}	10^{-6}
P-6	1×10^{-7}	10^{-7}
P-7	4×10^{-9}	10^{-6}
P-8	2×10^{-6}	10^{-6}
P-9	2×10^{-6}	10^{-7}
P-10	5×10^{-6}	10^{-7}
P-11	2×10^{-7}	10^{-7}
P-12	2×10^{-7}	10^{-7}
P-13	6×10^{-8}	10^{-7}
P-14	7×10^{-8}	10^{-3}

Les résultats des 128 essais concluants avec packers sont présentés sous forme de tableau à l'annexe A. L'annexe indique les profondeurs, les charges hydrauliques d'équilibre, la transmissivité et la conductivité hydraulique de la masse rocheuse équivalente pour chaque essai.

Les zones de fractures perméables dans chaque sondage peuvent être identifiées en comparant les résultats des essais de pompage de 1983 aux essais avec packers de 1984 et aux diagrammes par image acoustique des sondages. Ces zones perméables peuvent être mises en relation avec les alignements principaux et les structures géologiques par de simples projections du sous-sol à la surface.

Ainsi projetés, les essais d'hydraulique et les diagrammes par image acoustique révèlent que l'alignement 130 a une transmissivité de 6×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ (P-1, 35.3 à 42.0 m de profondeur), de 1×10^{-6} $m^2 \cdot s^{-1}$ (P-3, 17.0 à 31.8 m de profondeur) et de 3×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ (P-4, 42.0 à 54.0 m de profondeur). L'alignement 050 a une transmissivité de 8×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ (P-2, 25.0 à 34.6 m de profondeur), de 2×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ (P-5, 88.5 à 97.6 m de profondeur), de 2×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ (P-6, 41.0 à 49.5 m de profondeur), de 1×10^{-6} $m^2 \cdot s^{-1}$ (P-8, 34.4 à 38.5 m de profondeur) et de 9×10^{-8} $m^2 \cdot s^{-1}$ (P-14, 23.9 à 28.8 m de profondeur).

En plus de ces zones de très forte perméabilité, la plupart des sondages de la série P présentaient une forte transmissivité près de la surface (0 à 16 m de profondeur). D'autres zones importantes de forte transmissivité au-dessous de 16 m de profondeur ont été recoupées par le sondage P-4 à une profondeur de 26.8 à 33.3 m et de 37.0 à 40.0 m; le sondage P-5 à une profondeur de 45.0 à 61.0 m; le sondage P-6 à une profondeur de 21.0 à 25.0 m et de 57.0 à 61.0 m; le sondage P-8 à une profondeur de 18.2 à 18.8 m; le sondage P-9 à une profondeur de 33.0 à 37.0 m; et le sondage P-10 à une profondeur de 35.6 à 35.7 m, de 65.0 à 69.0 m et de 89.0 à 97.0 m. Les sondages P-12 et P-13 recoupaient les ramifications de la faille du lac Folson et révèlent des transmissivités variables de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-6} $m^2 \cdot s^{-1}$.

Les transmissivités moyennes des alignements 130 et 050 sont équivalentes à des conductivités hydrauliques moyennes de la masse rocheuse (K_{erm}) de 6×10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ et 1×10^{-7} $m \cdot s^{-1}$ respectivement. Ces conductivités hydrauliques sont approximativement égales ou une fois et demie supérieures à la conductivité hydraulique moyenne de la masse rocheuse du lac East Bull basée sur tous les essais d'écopage-rétablissement avec packer à deux éléments. Les alignements 050 et 130 représentent donc des voies très perméables d'écoulement des eaux souterraines dans la couche supérieure de 100 m d'épaisseur de la région étudiée du lac East Bull.

La distribution de la conductivité hydraulique équivalente de la masse rocheuse mesurée pendant les essais dans les sondages de la série P est présentée sous forme d'un histogramme dans la figure 11 et sous forme d'une courbe de probabilité cumulative dans la figure 12. Dans les deux figures, la conductivité hydraulique K_{erm}, mesurée en mètres par séconde, est représentée sous forme de logarithme décimal. La moyenne géométrique de la distribution est 1×10^{-8} $m \cdot s^{-1}$. Le logarithme décimal de l'écart-type ($\log \sigma$) de la distribution est 0.97. La relation linéaire approximative dans le diagramme de la probabilité cumulative indique que la conductivité hydraulique approche une distribution log-normale à deux paramètres (Atchison et Brown, 1957).

Les figures 11 et 12 montrent aussi la distribution de la conductivité hydraulique de la masse rocheuse équivalente mesurée dans les laboratoires nucléaires de Chalk River à partir des sondages de la série FS (Raven, 1986). Les données de Chalk River représentées dans les figures 11 et 12 ont été établies à partir de 340 essais d'injection avec des packers à deux éléments (section d'essai d'une longueur de 2 m) qui ont eu lieu dans la couche supérieure de 75 m d'épaisseur d'un gneiss monzonique quartzeux. La comparaison des deux distributions est intéressante car les deux ensembles de données proviennent d'essais effectués avec des packers à deux éléments à des profondeurs semblables (0 à 75 m) dans des sondages essentiellement à percussion. Les résultats limites des essais d'injection de Chalk River sont d'un ordre de grandeur plus petit (c'est-à-dire 10^{-11} $m \cdot s^{-1}$) et plus grand (c'est-à-dire 10^{-4} $m \cdot s^{-1}$) que ceux des essais hydrauliques effectués au lac East Bull. La distribution de la conductivité hydraulique pour le lac East

Bull se trouve ainsi tronquée à une valeur inférieure de 10^{-10} $m \cdot s^{-1}$; à la limite supérieure, la distribution n'a pas été tronquée car aucun essai ne présente une conductivité hydraulique supérieure à 10^{-6} $m \cdot s^{-1}$.

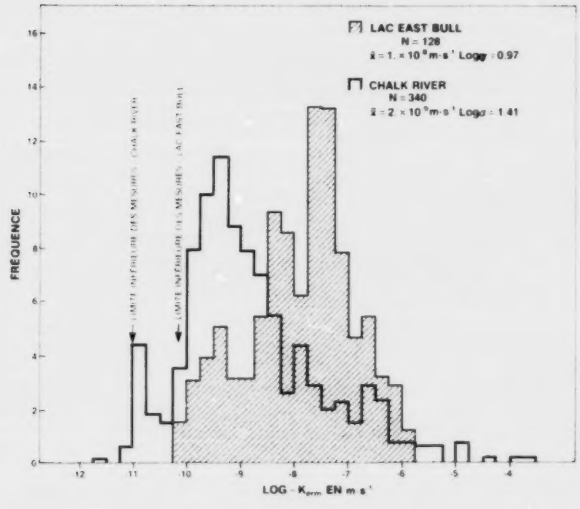

Figure 11. Histogramme de la distribution du logarithme décimal de la conductivité hydraulique de la masse rocheuse équivalente, K_{erm}, déterminée d'après les essais à packers entre 0 et 75 m de profondeur dans les zones de recherche du lac East Bull et de Chalk River.

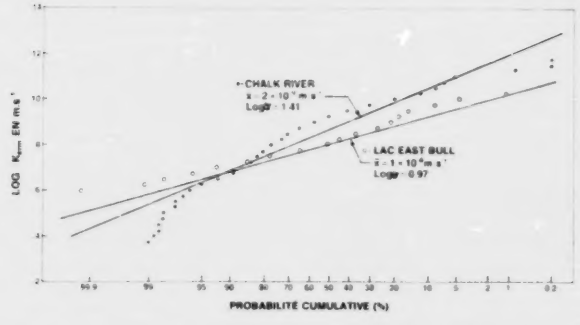

Figure 12. Courbe de probabilité cumulative du logarithme décimal de la conductivité hydraulique d'une masse rocheuse équivalente, K_{erm}, déterminée d'après les essais à packers entre 0 et 75 m de profondeur dans les zones de recherche du lac East Bull et de Chalk River.

Les deux distributions sont différentes, car la moyenne géométrique et la valeur modale sont plus grandes pour les données du lac East Bull que pour celles de Chalk River. Les données du lac East Bull présentent aussi un écart type plus petit et approchent davantage d'une distribution log-normale à deux paramètres. Les données de Chalk River sont biaisées à droite (conductivités hydrauliques élevées); des conductivités hydrauliques aussi élevées ne sont pas observées dans la distribution du lac East Bull.

La moyenne géométrique et la valeur modale plus grandes pour les données du lac East Bull dénotent le plus grand nombre d'alignements structuraux recoupés par les sondages de la série P. Les sondages de la série FS de Chalk River ont été forés dans une zone sans alignements structuraux importants et par conséquent ont une moyenne géométrique et une conductivité hydraulique modale inférieures aux données du lac East Bull. Les données sur la conductivité hydraulique pour les sondages de la série P qui ne recoupent pas les alignements structuraux principaux (c'est-à-dire P-7, 9, 10, 11 et 14) ont une moyenne géométrique (c'est-à-dire 2×10^{-9} $m \cdot s^{-1}$) et une valeur modale plus petites que celles de l'ensemble complet de données de la série P et concordent davantage avec l'ensemble de données de Chalk River.

L'absence de mesures de conductivité hydraulique supérieures à 10^{-6} $m \cdot s^{-1}$ dans les essais du lac East Bull est importante car les mêmes sections des sondages à Chalk River comportaient d'importantes zones de fractures de forte perméabilité qui déterminent le comportement des systèmes d'écoulement des eaux souterraines dans la couche supérieure de 50 m d'épaisseur de la roche mère (Raven, 1986). L'absence de telles sections de très forte perméabilité au lac East Bull reflète probablement un certain nombre de différences géologiques importantes entre l'emplacement du lac East Bull et celui de Chalk River. Ces différences comprennent la lithologie, l'histoire tectonique, les caractéristiques des fractures, l'état des contraintes et la minéralogie du remplissage des fractures.

SONDAGES DE LA SÉRIE LEB

En 1983, des essais avec packers simples et packers doubles et des essais de pompage à découvert ont été accomplis dans les sondages LEB-1 et LEB-2. La méthode et les résultats de ces essais sont brièvement présentés par Raven et coll. (1984).

En 1984, un programme de suivi (contrôles de la charge hydraulique, essais de conductivité hydraulique et échantillonnages de l'eau souterraine) a été réalisé dans les sondages LEB-1, 2 et 4. Ces travaux ont été accomplis au moyen d'une série de packers semi-permanents (packers d'injection, PIP "Lynes") qui ont été installés en octobre et novembre 1983. Les essais avec packer simple et packer double et les essais de pompage à découvert ont eu lieu aussi en 1984 dans les sondages LEB-1, 2 et 4 après le retrait des PIP.

La caractérisation hydrogéologique a continué en 1985 avec des tubages pour packers multiples installés de façon permanente (voir chapitre 5) dans les sondages LEB-1, 2, 3 et 4, en octobre et novembre 1984. Les essais d'hydraulique ont eu lieu dans certaines sections des tubages des sondages LEB-1, 2, 3 et 4, en même temps que le contrôle de la charge hydraulique et l'échantillonnage de l'eau souterraine qui s'inscrivaient dans le cadre du programme de caractérisation de 1985.

Cette section résume la méthode, les résultats et l'interprétation des programmes d'essais d'hydraulique de 1983, 1984 et 1985 accomplis dans les sondages de la série LEB.

Méthode

Essais de 1983

En 1983, la conductivité hydraulique a été déterminée à partir des résultats des essais avec packer simple, des essais avec packer double et des essais de pompage à découvert. Des essais d'onde de pression et d'injection avec des packers simples et des packers doubles ont été faits dans le sondage LEB-1. Des essais d'écopage-rétablissement avec packers simples ont été faits dans le sondage LEB-2. Des essais de pompage à découvert ont été faits dans les sondages LEB-1 et LEB-2.

Essais à packers dans LEB-1

Des essais d'injection et d'onde de pression ont été faits dans le sondage LEB-1 à l'aide d'un packer de sondage qui était remonté et abaissé dans le sondage au bout d'un câble ombilical par un dévidoir électrique monté sur une grande remorque-plateau (figure 13). Le câble ombilical et le packer de sondage double sont représentés en détail dans la figure 14.

Le câble ombilical est composé de deux câbles à sept conducteurs doublement armés, électriques et de tension, de trois tubes en nylon de 9.5 mm, de trois tubes de remplissage en nylon de 9.5 mm et d'un tube simple en

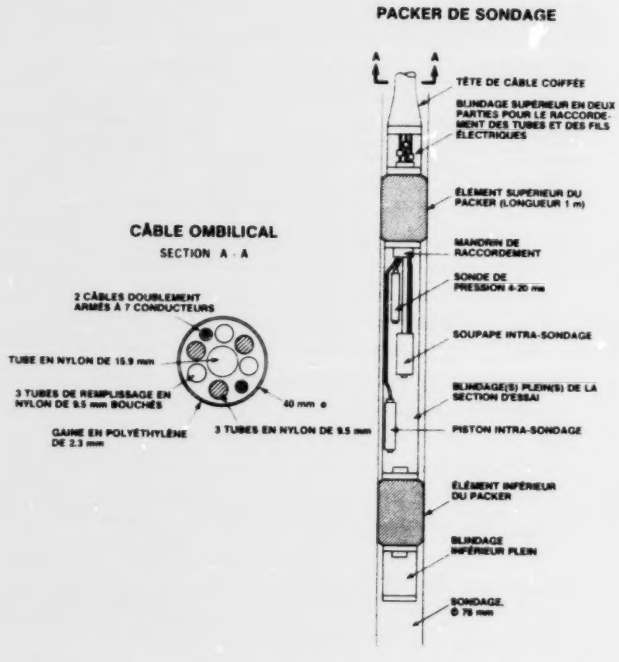

Figure 14. Schéma du packer double de sondage et du câble ombilical utilisés pendant les essais à packers dans le sondage LEB-1 en 1983.

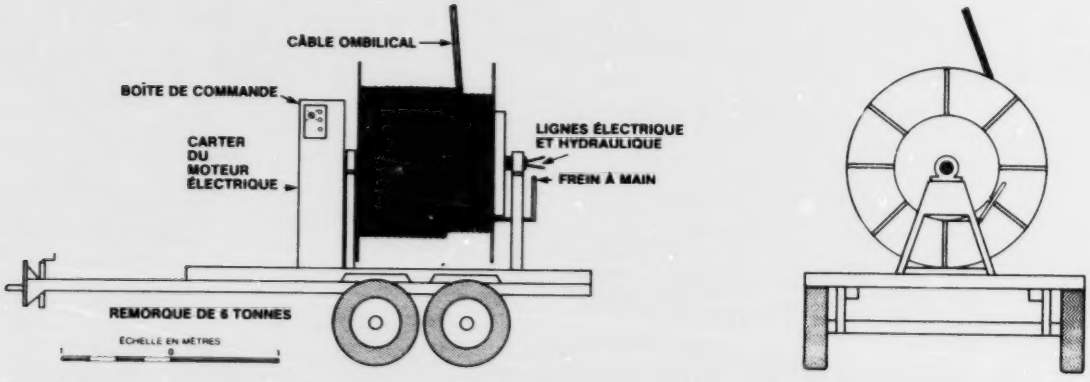

Figure 13. Câble ombilical et dévidoir électrique utilisés pendant les essais à packers dans le sondage LEB-1 en 1983.

nylon de 15.9 mm. Tous les tubes étaient conçus pour les faibles pressions, la pression d'éclatement étant d'environ 7.0 MPa. Une gaine extérieure en polyuréthane de 1.6 mm d'épaisseur a été appliquée par extrusion sur les câbles et les tubes pour former un câble ombilical composé de 40 mm de diamètre. Une longueur de 800 m de ce câble composé est enroulée sur le dévidoir.

Le packer de sondage incorpore une sonde de pression de 4 à 20 mA ainsi qu'une soupape et un piston commandés hydrauliquement. La sonde de pression à boucle de courant a été préférée aux transducteurs de pression CC-CC plus classiques car elle donne lieu à moins de pertes en ligne dans la transmission du signal le long du câble électrique de 800 m, le signal étant ainsi plus fiable.

La soupape descendante a été utilisée pour isoler hydrauliquement la section d'essai des 800 m de tube remplis de fluide tant dans le sondage qu'en surface sur le dévidoir. L'isolation de la section d'essai a permis d'accroître la fiabilité des mesures de la pression statique (ou charge hydraulique d'équilibre) en éliminant les transitoires d'écoulement thermique et de pression observés fréquemment en surface dans le câble ombilical. L'isolation du câble ombilical de la section d'essai a aussi permis d'effectuer des essais d'onde de pression dans des sections d'essai de faible perméabilité. Un schéma détaillé de la soupape intra-sondage est donné dans la figure 15. Un ressort réglable de réouverture de la soupape est prévu pour contrer les charges hydrauliques élevées dans le câble ombilical au-dessus de la section d'essai. Ces charges hydrauliques élevées sont souvent dues à la diminution de la charge hydraulique dans les sections d'essai avec la profondeur et à la charge supplémentaire imposée lorsque l'on suspend le câble ombilical sur la poulie à gorge et le trépied en surface. La ligne d'eau de commande et le ressort de réouverture ont été prévus à cause des faibles pressions que peuvent supporter les tubes.

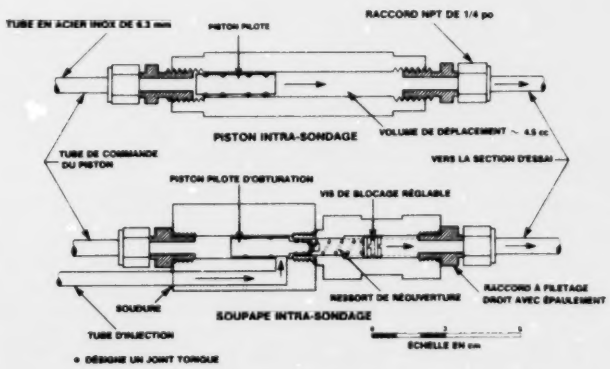

Figure 15. Schéma du piston et de la soupape incorporés dans le packer double de sondage utilisés pour vérifier hydrauliquement le sondage LEB-1 en 1983.

Le piston intra-sondage a été utilisé dans des essais d'onde de pression pour mesurer la conductivité hydraulique dans les sections d'essai. L'isolation des sections d'essai des tubes de compressibilité variable et incertaine dans le câble ombilical a permis de réduire considérablement le produit compressibilité volume de la section d'essai et d'augmenter la résolution des données et la fiabilité des résultats des essais. Le déplacement connu du volume du piston ($\approx$4.5 mL) ainsi que les essais d'ondes de pression ont permis d'établir une valeur étalon du produit de la compressibilité du volume de l'intervalle d'essai nécessaire pour l'analyse des données (Raven et coll., 1984). Le piston était commandé soit pneumatiquement, soit hydrauliquement, à partir de la surface. Il est aussi illustré dans la figure 15.

Pendant les essais d'injection en régime permanent les débits ont été mesurés en surface au moyen d'une série de réservoirs de stockage à hauteur constante et de diamètre variable, et d'une sonde de pression différentielle pour indiquer le niveau du fluide dans les réservoirs. La pression pour injecter le fluide, gonfler le packer et commander le piston et le soupape intra-sondage a été appliquée au moyen d'azote ou d'air comprimé. L'équipement de mesure des débits et de mise sous pression est illustré schématiquement dans la figure 16. Les packers ont été gonflés à l'eau.

L'acquisition, la réduction et l'analyse des données des essais d'hydraulique accomplis dans le sondage LEB-1 ont été faites au moyen d'un micro-ordinateur Apple IIE avec stockage sur disquettes souples et d'une imprimante sur papier. Des enregistreurs sur bandes et des dispositifs de détection analogique ont été aussi incorporés dans le système d'acquisition des données. Le système d'acquisition des données est présenté dans la figure 17.

Les débits (Q) et les charges d'injection (ΔH) en régime permanent ont été enregistrés pendant chaque essai d'injection. Une série d'essais d'injection avec packer simple ont été accomplis, à chaque 50 m, à partir de la surface jusqu'à 650 m de profondeur dans le sondage LEB-1. Des essais avec packer double ont été faits dans la couche supérieure de 150 m d'épaisseur du sondage LEB-1. Le débit par unité de charge d'injection ($Q/\Delta H$) est lié à la conductivité hydraulique d'une masse rocheuse équivalente (K_{erm}) par le truchement des équations (2) et (3) :

$$K_{erm} = \frac{Q}{\Delta H 2\pi L} \ln (r_b/r_w) \qquad (4)$$

où r_b, r_w et L sont les mêmes paramètres que ceux des équations (2) et (3).

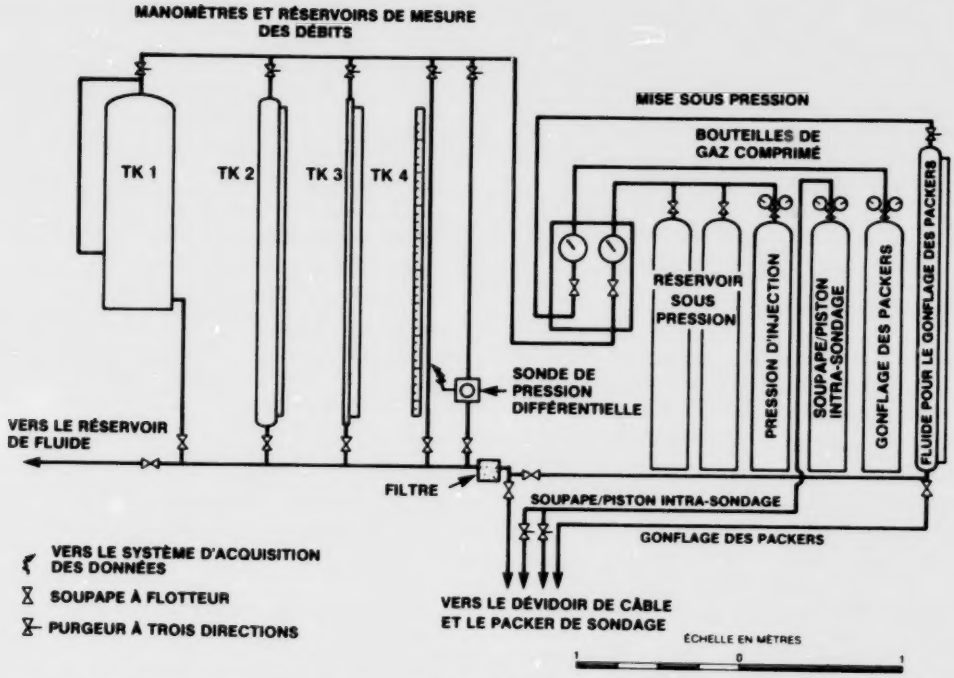

Figure 16. Schéma de l'équipement de mesure des débits et de mise sous pression utilisé pendant les essais à packers dans le sondage LEB-1 en 1983.

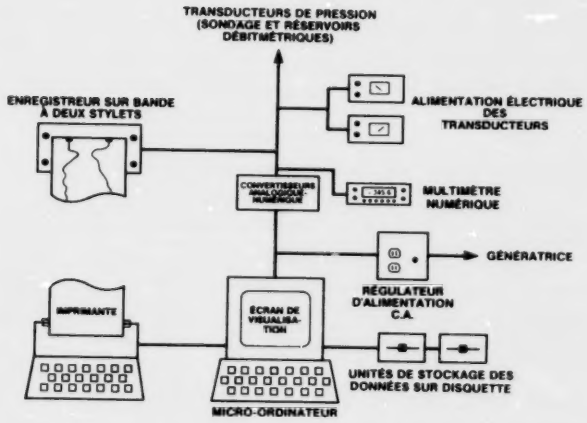

Figure 17. Schéma du système d'acquisition des données utilisé pendant les essais à packers dans le sondage LEB-1 en 1983.

Essais à packers dans LEB-2

Les essais avec packers dans le sondage LEB-2 ont été faits au moyen d'une installation de reconditionnement, d'une colonne montante AQ et d'un packer simple. La figure 18 représente schématiquement l'équipement utilisé pour ces essais. Elle montre un packer d'injection-production (PIP) fixé au bas de la colonne montante AQ. Pendant les essais de 1983, ce PIP a été remplacé par un packer simple qui a été gonflé hydrauliquement à partir de la surface à l'aide d'une conduite hydraulique fixée sur l'extérieur des

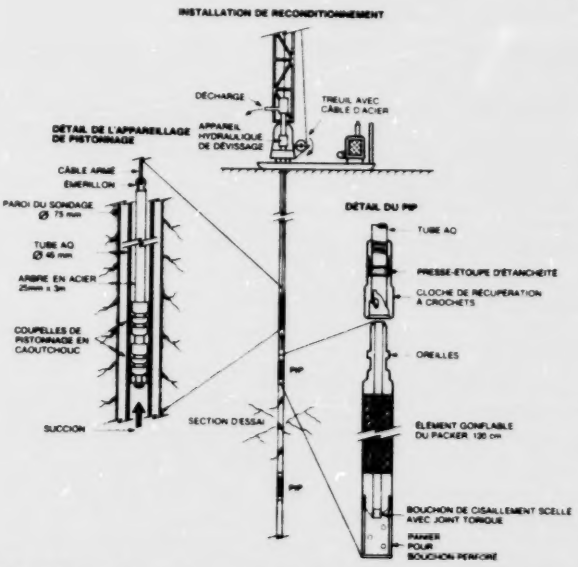

Figure 18. Schéma de l'équipement utilisé pour les essais d'hydraulique montrant l'installation de reconditionnement de l'appareil de pistonnage et le packer d'injection-production (PIP).

tubes AQ. Il n'y a eu qu'un nombre limité d'essais dans le sondage LEB-2. Des essais d'écopage-rétablissement ont été accomplis avec succès à chaque 50 m environ de la surface jusqu'à 250 m de profondeur, et à 440 m de profondeur. Le niveau a été abaissé à l'aide d'un outil de pistonnage relié à un treuil par un câble d'acier. Les données des essais ont été analysés pour déterminer la transmissivité (T) par la méthode de Cooper et coll. (1967), puis pour déterminer $Q/\Delta H$ dans l'équation (3).

Essais de pompage à découvert

Les essais de pompage à découvert ont été faits dans les sondages LEB-1 et LEB-2. Les deux sondages ont été pompés au moyen de pompes électriques submersibles à raison de 10 $L \cdot min^{-1}$ environ pendant 500 min. Les abaissements de niveau ont été mesurés avec un ruban limnimétrique à contacts électriques. Des courbes log-log de diagnostic de l'abaissement du niveau en fonction du temps ont été établies.

Essais de 1984

Des essais de conductivité hydraulique ont été effectués en 1984 avec des PIP, des packers simples, des packers doubles et à découvert.

Essais avec PIP

Des packers d'injection-production ont été installés dans les sondages LEB-1, 2 et 4 en octobre et novembre 1983. Ces packers ont été installés à des profondeurs de 147, 298, 512 et 650 m dans le sondage LEB-1, à 75, 250, 460 et 616 m dans le sondage LEB-2 et à 120, 198 et 396 m dans le sondage LEB-4. Les sections d'essai créés par ces PIP ont été soumises à de nombreux essais, pompages et contrôles en 1984 en vue d'obtenir des données hydrauliques et des échantillons d'eau souterraine représentatifs. Le fluide a été extrait de chaque section d'essai isolée par PIP, par pompage combinant «air-lift», pistonnage et pompage sous pression. Le schéma de l'équipement utilisé pendant les essais PIP, y compris le schéma d'un PIP et celui de l'appareil de pistonnage est présenté dans la figure 18.

Le débit par unité de charge d'injection ($Q/\Delta H$) pour chaque section d'essai isolée par PIP a été déterminé à partir d'une variété d'essais dont les suivants : rétablissement après injection d'un bouchon, rétablissement après écopage, pistonnage en régime pseudo-permanent air-lift et injection. Des essais de rétablissement du niveau après injection d'un bouchon ont été faits régulièrement dès que le bouchon de cisaillement (figure 18) était expulsé du PIP, définissant ainsi la limite supérieure de la section d'essai. Le rétablissement du niveau du fluide à partir du haut des tubes AQ jusqu'à une valeur d'équilibre a été contrôlée et analysée par les méthodes sus-décrites pour les essais d'écopage-rétablissement. Des essais d'écopage-rétablissement ont été calculés en réponse au pistonnage au câble. Des essais de pistonnage en régime pseudo-permanent et de pompage «air-lift» ont été accomplis dans les sections d'essai de forte perméabilité (c'est-à-dire, LEB 1-4, 4-1, 4-2 et 4-3) où les courts temps de rétablissement empêchaient tout essai d'écopage ou d'injection d'un bouchon. Pour ces sections d'essai, un débit moyen et une charge de soutirage ont été estimés à partir des mesures de volume de pistonnage et d'abaissement du niveau enregistrés pendant des périodes de plusieurs jours. Des essais par injection ont été faits pour mesurer les rapports $Q/\Delta H$ des sections d'essai de faible perméabilité (c'est-à-dire LEB 2-1) en mettant sous pression les tubes AQ et en contrôlant les changements de niveau du fluide dans les tubes.

Un essai de pompage à long terme a été mené du 2 au 14 mai 1984 pour évaluer les propriétés hydrauliques et l'interconnection de la zone fracturée à la base de l'horizon de troctolite. La base de cet horizon recoupe les sondages LEB-1, 2 et 4 à des profondeurs de 210, 122 et 185 m respectivement. La section isolée par PIP du sondage LEB-1 à 4 (147-298) m) a été pompée pendant 13 jours, le débit moyen de soutirage étant de 10 $L \cdot min^{-1}$. Les sections LEB-2 à 4 (75 à 250 m), 2 à 5 (0.75 m), 4 à 3 (120 à 128 m) et 4 à 4 (0 à 120 m) ont été contrôlées pendant la période de pompage, et jusqu'au 14 mai 1984.

Essais à packers

Plusieurs essais avec packers simples et packers doubles ont été faits dans les sondages des séries LEB après l'enlèvement des PIP. Des essais d'écopage-rétablissement et de pistonnage avec packers simples ont été faits pour fins d'échantillonnage géochimique dans le sondage LEB-4, de 450 m à 498 m de profondeur. Un essai d'écopage avec packer double a aussi été fait pour évaluer la conductivité hydraulique de la zone fracturée à 400 m de profondeur dans le sondage LEB-1.

L'horizon de troctolite recoupé à 210 m dans le sondage LEB-1 a aussi fait l'objet d'un essai de pompage intermittent, du 4 juillet au 11 juillet 1984; l'essai s'est fait avec un packer simple et une pompe électrique submersible située à 100 m de profondeur. Le packer simple isolait la première couche perméable de 100 m de profondeur, du sondage LEB-1 de la section d'essai de 100 à 650 m. Comme les essais d'injection ont montré que la base du troctolite était l'horizon le plus perméable dans la section pompée, nous pouvons supposer que la réponse observée reflète les propriétés hydrauliques de la base de l'unité de troctolite. L'essai de pompage avec packer simple a aussi

servi à confirmer les résultats des essais de pistonnage accomplis dans la section isolée par PIP dans LEB-1 à 4.

Essais de pompage à découvert

Trois essais de pompage à découvert ont été faits en 1984. Le sondage LEB-1 a été pompé à l'aide d'une pompe électrique submersible qui a soutiré en moyenne 16 $L \cdot min^{-1}$ d'eau du 24 juin au 3 juillet 1984. L'abaissement du niveau dans le puits de pompage a été contrôlé au moyen d'une sonde de pression submersible et du système d'acquisition des données décrit dans la section sur les essais avec packers dans LEB-1. Des courbes de diagnostic de l'abaissement du niveau en fonction du temps ont été établies sur diagramme log-log.

Le sondage LEB-3 a été pompé avec une pompe semblable à raison de 10 $L \cdot min^{-1}$ pendant 60 min. Les mesures de l'abaissement du niveau en fonction du temps ont révélé une persistance de l'emmagasinage dans le puits de forage pendant toute la période de pompage; ces données n'ont donc pu être analysées pour déterminer les propriétés hydrauliques de la masse rocheuse. Toutefois, comme la période de pompage était relativement courte par rapport à la période de rétablissement ou de récupération, les données de récupération ont été analysées par la méthode de Cooper et coll. (1967) pour déterminer la transmissivité dans le sondage.

Un essai d'abaissement du niveau (ou de rabattement) par étapes de 500 min a été accompli dans le sondage LEB-4. On a utilisé des débits de pompage de 10, 15 et 17.5 $L \cdot min^{-1}$. Le rabattement a été mesuré avec un ruban limnimétrique à contacts électriques. Une courbe log-log de rabattement pour le débit de pompage de 10 $L \cdot min^{-1}$ a été établie. Un tableau du débit en régime pseudo-permanent par unité de rabattement ($Q/\Delta H$) a été établi pour chaque débit de pompage afin de déterminer la non-linéarité de la relation pression-débit.

Essais de 1985

En 1985, un nombre limité d'essais de conductivité hydraulique ont été faits dans les sondages de la série LEB, la plupart au moment de l'échantillonnage de l'eau souterraine par «air-lift» de l'intérieur des tubages contenant plusieurs packers. Les sections d'essai en 1985 ont été choisis en fonction de l'emplacement des packers sous tubage (voir chapitre 5). Six sections dans le sondage LEB-1, trois dans LEB-2 et deux dans LEB-4 ont fait l'objet d'essais d'hydraulique. Les débits par unités de charge pour ces sections ont été déterminés à partir d'essais d'écopage dans les tubages en plastique et à partir d'essais de pompage par «air-lift» au régime pseudo-permanent.

Résultats et interprétation

Les résultats des essais avec packers simples et packers doubles effectués dans les sondages LEB-1 et LEB-2 en 1983 sont donnés dans les tableaux 4 et 5 respectivement et représentés graphiquement dans la figure 19. Les résultats des essais avec PIP de 1984 dans les sondages LEB-1, 2 et 4 sont donnés au tableau 6 et représentés graphiquement dans la figure 19. Les résultats des essais d'hydraulique de 1985 accomplis dans les tubages contenant plusieurs

Tableau 4. Sommaire des résultats des essais à packers de 1983 pour le sondage LEB-1

Profondeur (m)	$Q/\Delta H$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
8.00-13.06	3×10^{-6}	5×10^{-7}
10.00-15.06	2×10^{-6}	3×10^{-7}
15.00-20.06	4×10^{-7}	5×10^{-8}
19.40-24.46	4×10^{-8}	5×10^{-9}
25.40-30.46	7×10^{-8}	1×10^{-8}
30.00-35.06	8×10^{-8}	1×10^{-8}
35.00-40.06	4×10^{-8}	5×10^{-9}
40.00-45.06	3×10^{-7}	5×10^{-8}
45.00-50.06	5×10^{-9}	7×10^{-10}
49.55-54.61	2×10^{-9}	3×10^{-10}
55.60-60.66	4×10^{-10}	5×10^{-11}
60.00-65.06	8×10^{-10}	1×10^{-10}
65.00-70.06	4×10^{-9}	7×10^{-10}
70.00-75.06	3×10^{-9}	5×10^{-9}
75.00-80.06	6×10^{-8}	9×10^{-9}
84.90-89.06	8×10^{-7}	1×10^{-7}
89.34-94.40	–	–
92.50-97.56	6×10^{-10}	1×10^{-10}
95.20-100.26	1×10^{-9}	1×10^{-10}
100.00-105.26	1×10^{-8}	2×10^{-9}
180.00-185.06	2×10^{-10}	4×10^{-11}
150.70-250.00	8×10^{-8}	7×10^{-7}
250.00-300.00	1×10^{-8}	2×10^{-10}
300.00-350.00	2×10^{-8}	3×10^{-10}
350.00-400.00	3×10^{-9}	5×10^{-11}
400.00-448.00	2×10^{-7}	4×10^{-9}
448.00-500.00	3×10^{-7}	3×10^{-9}
500.00-549.00	5×10^{-8}	7×10^{-10}
549.00-600.00	8×10^{-11}	1×10^{-12}
599.00-652.00	9×10^{-11}	1×10^{-12}
652.00-850.70	5×10^{-10}	2×10^{-12}

Tableau 5. Sommaire des résultats des essais à packers de 1983 pour le sondage LEB-2

Profondeur (m)	$Q/\Delta H$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
0.00-50.00	1×10^{-6}	2×10^{-8}
50.00-75.00	8×10^{-7}	2×10^{-8}
75.00-100.00	3×10^{-7}	9×10^{-9}
100.00-150.00	5×10^{-7}	8×10^{-9}
150.00-200.00	2×10^{-8}	3×10^{-10}
200.00-250.00	7×10^{-8}	1×10^{-9}
250.00-440.00	4×10^{-7}	2×10^{-9}
440.00-835.60	2×10^{-8}	5×10^{-11}

Tableau 6. Sommaire des résultats des essais avec PIP de 1984 pour les sondages de la série LEB

Section	Profondeur	Niveau statique* de l'eau (m)	$Q/\Delta H$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
LEB 1-5	0-147	3.9	2×10^{-6}	1×10^{-8}
LEB 1-4	147-298	6.0	1×10^{-6}	7×10^{-9}
LEB 1-3	298-512	11.0	2×10^{-7}	9×10^{-10}
LEB 1-2	512-650	17.0	5×10^{-8}	3×10^{-10}
LEB 1-1	650-851	---------- Pas atteint ----------		
LEB 2-5	0-75	3.5	2×10^{-6}	2×10^{-8}
LEB 2-4	75-250	21.0	6×10^{-7}	3×10^{-9}
LEB 2-3	250-460	30.0	2×10^{-9}	8×10^{-12}
LEB 2-2	460-616	30.0?	1×10^{-9}	6×10^{-12}
LEB 2-1	616-836	30.0?	4×10^{-10}	2×10^{-12}
LEB 3	0-442	9.0	5×10^{-7}	1×10^{-9}
LEB 4-4	0-120	2.9	6×10^{-7}	4×10^{-9}
LEB 4-3	120-198	5.1	2×10^{-7}	2×10^{-9}
LEB 4-2	198-396	20.7	3×10^{-8}	1×10^{-10}
LEB 4-1	396-489	40.0	2×10^{-7}	2×10^{-9}

* Profondeur en mètres au-dessous du sommet du tubage du sondage.

Tableau 7. Sommaire des essais d'hydraulique de 1985 dans les sondages de la série LEB

Sondage	Section dans le tubage*	Profondeur (m)	$Q/\Delta H$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
LEB-1	1	626-650	3×10^{-8}	1×10^{-9}
LEB-1	1-6	504-650	4×10^{-7}	2×10^{-9}
LEB-1	17	204-213	3×10^{-7}	3×10^{-8}
LEB-2	21	156-174	2×10^{-9}	9×10^{-11}
LEB-2	23	111-126	1×10^{-6}	7×10^{-8}
LEB-4	2,3	429-456	3×10^{-7}	1×10^{-8}
LEB-4	22	105-117	4×10^{-7}	3×10^{-8}

* Voir tableau 9 dans chapitre 5.

packers sont donnés dans le tableau 7. Les résultats susmentionés et ceux des essais de pompage à découvert sont analysés et interprétés séparément pour chaque sondage.

Sondage LEB-1

Nous pouvons comparer les résultats des essais avec packers de 1983 et ceux des essais avec PIP de 1984 dans des sections de différentes longueurs en examinant les données de base sur le débit et la charge. Le débit par unité de charge ($Q/\Delta H$) pour le sondage LEB-1 est représenté sous forme de logarithme décimal négatif (p) de $Q/\Delta H$, où $Q/\Delta H$ est en mètres carrés par seconde. Les résultats des deux programmes d'essais sont semblables à l'exception des essais de l'horizon de troctolite dans la section isolée par PIP entre 147 et 298 m de profondeur. Les essais avec packers de 1983 ont indiqué une valeur de $Q/\Delta H$ de 8×10^{-5} $m^2 \cdot s^{-1}$ (section entre 150 et 250 m de profondeur), tandis que les essais avec PIP ont donné une valeur de $Q/\Delta H$ de 1×10^{-6} $m^2 \cdot s^{-1}$ (section entre 147 et 298 m de profondeur). Les différentes valeurs $Q/\Delta H$ tiennent vraisemblablement aux différences quant aux techniques d'essai et à la durée des essais. Les résultats de 1983 ont été déterminés à partir d'essais d'injection de courte durée (30 à 60 min) et mesurent donc les propriétés hydrauliques près du sondage. Les résultats des essais avec PIP ont été déterminés à partir d'essais de pompage et de pistonnage beaucoup plus longs (plusieurs semaines) et mesurent vraisemblablement les propriétés hydrauliques dans le champ lointain des fractures.

Les essais de pompage avec packers simples accomplis en 1984 dans la section de 100 à 650 m et les essais de soutirage dans la section avec tubage accomplis en 1985 à une profondeur de 204 à 213 m fournissent d'autres mesures fiables sur la conductivité hydraulique de la base de l'horizon de troctolite. Ces deux séries d'essais donnent pour $Q/\Delta H$ une valeur de 3×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$. Pour l'intervalle de 9 m de la section d'essai allant de 204 à 213 m de profondeur, on obtient alors une conductivité hydraulique de la masse rocheuse équivalente d'environ 3×10^{-8} $m \cdot s^{-1}$. Ces propriétés hydrauliques semblent être les plus représentatives des galets de troctolite et de la zone de fractures à 210 m de profondeur au voisinage du sondage LEB-1.

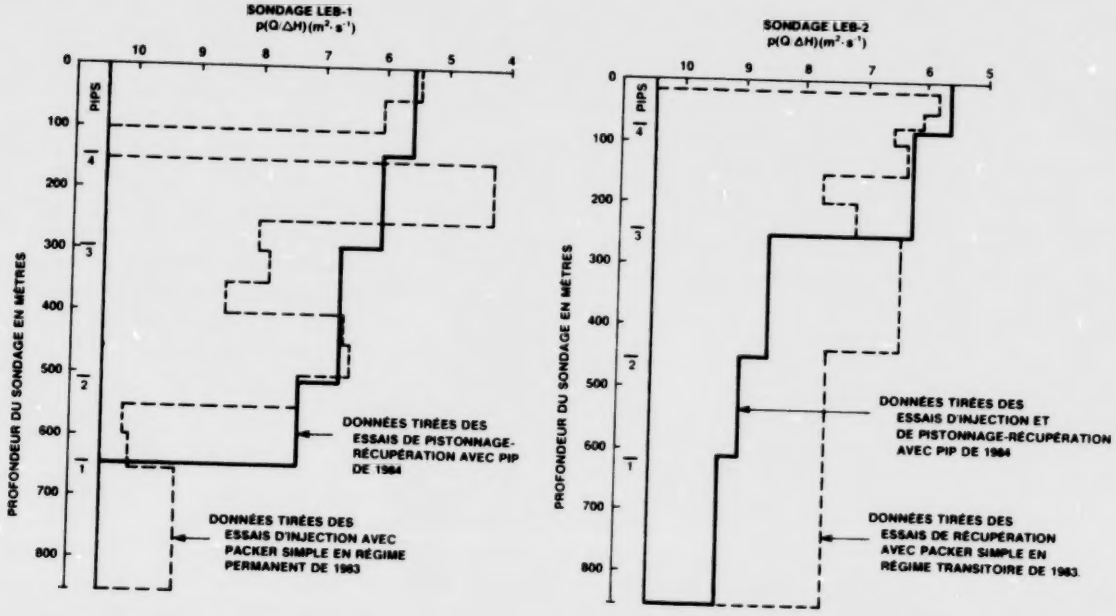

Figure 19. Profil de débit par unité de charge (Q/ΔH) pour les sondages LEB-1 et LEB-2, déterminés à partir des essais à packers de 1983 et des essais à PIP de 1984. Les données sont représentées sous forme du logarithme décimal négatif (p) de Q/ΔH exprimé en mètres carrés par seconde.

L'étude d'interférence, accomplie du 2 au 14 mai 1984 à partir de la section d'essai avec PIP, qui isolait l'horizon de troctolite dans le sondage LEB-1, fournit des renseignements sur les propriétés hydrauliques inter-sondages dans la base fracturée de l'unité. Les données de rabattement en fonction du logarithme du temps pour les sections d'essai isolées par PIP LEB 2 à 4 et 4 à 3, qui recoupent la base de l'unité de troctolite, sont présentées dans la figure 20. Les intervalles d'observation montrent une baisse simultanée de 0.20 à 0.30 m des niveaux de fluide vers la fin de l'essai de pompage, soit du 14 au 16 mai 1984. Vu que les rabattements observés étaient faibles, dus probablement à des variations de la pression barométrique, les variations de la pression barométrique locale, telles qu'émises par Environnement Canada, sont aussi indiquées dans la figure 20. L'enregistrement de la pression barométrique montre que les rabattements observés sont le produit d'une augmentation de la pression barométrique vers la fin de l'essai de pompage.

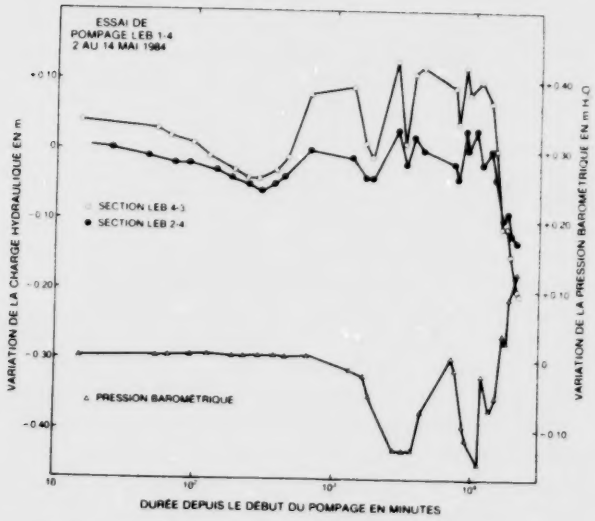

Figure 20. Variations de la charge hydraulique dans les sections d'observation LEB et variation de la pression barométrique en fonction du logarithme du temps pendant l'essai de pompage dans le sondage LEB-1 de la zone fracturée de troctolite, à 210 m de profondeur.

Vu qu'aucun rabattement n'a été observé dans les intervalles d'observation, une diffusivité hydraulique maximale (κ) peut être estimée à partir de la période d'observation (t_o) et de la distance inter-sondage (R), selon la relation :

$$\kappa = \frac{CR^2}{t_o} \qquad (5)$$

où C est une constante qui dépend de la solution approchée de l'équation d'écoulement radial de l'eau souterraine autour d'une source linéaire. La constante C a été évaluée

par Cooper et Jacob (1946) à 0.45, et par Johnson et coll. (1966), à 0.25. En utilisant C = 0.45, on obtient des diffusivités hydrauliques maximales de 7×10^{-2} et 1×10^{-1} $m^2 \cdot s^{-1}$ entre le sondage LEB-1 et les sondages LEB-2 et LEB-4 respectivement. Avec une estimation raisonnable de la capacité d'emmagasinage de 1×10^{-6}, on obtient pour ces diffusivités maximales des transmissivités maximales correspondantes de 7×10^{-8} et 1×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ qui sont voisines de la valeur de $Q/\Delta H$ de 3×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ déterminée à partir de plusieurs essais dans le même sondage LEB-1.

En plus de la base de l'horizon de troctolite, les essais d'hydraulique ainsi que des diagraphies ont révélé des zones de fractures très perméables à des profondeurs de 45, 87, 440, 475, 490 et 510 m. Les fractures présumément ouvertes décelées à une profondeur de 405 à 410 m par les diagraphies, ont été testées hydrauliquement avec des packers doubles et semblent être imperméables ($Q/\Delta H$ de 5×10^{-11} $m^2 \cdot s^{-1}$ et K_{erm} de 7×10^{-12} $m \cdot s^{-1}$). Les fractures à 510 m de profondeur donnent des valeurs de $Q/\Delta H$ de l'ordre de 5×10^{-8} $m^2 \cdot s^{-1}$ (essais avec PIP de 1984) à 4×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ (essais avec tubage de 1985). Vu que les essais avec tubage sont relativement courts comparés aux essais avec PIP, la valeur de $Q/\Delta H$ de 5×10^{-8} $m^2 \cdot s^{-1}$ est vraisemblablement plus représentative des propriétés hydrauliques dans le champ lointain des fractures. Les fractures à 45 et 87 m de profondeur ont donné des valeurs de $Q/\Delta H$ de 3×10^{-7} et 8×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ respectivement. Les fractures à 440 m de profondeur ont une valeur de $Q/\Delta H$ de 2×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ d'après les essais avec packers de 1983. Les fractures à 475 et 490 m de profondeur semblent être perméables avec un $Q/\Delta H$ moyen de 3×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ d'après les essais avec packers de 1983 et les essais avec PIP de 1984. Pour mieux connaître les propriétés hydrauliques de chaque zone fracturée, il faudrait faire des essais d'hydraulique plus détaillés.

Les résultats des essais d'hydraulique de 1983, 1984 et 1985 dans le sondage LEB-1, exprimés en termes de conductivité hydraulique d'une masse rocheuse équivalente (K_{erm}), présentent une diminution logarithmique avec la profondeur. Dans des sections d'essai allant de 50 à 100 m, les valeurs de K_{erm} passent de 1×10^{-8} en surface à 1×10^{-12} $m \cdot s^{-1}$ en profondeur. Au-dessous de 510 m de profondeur, la masse rocheuse a une faible conductivité hydraulique, généralement inférieure à 2×10^{-12} $m \cdot s^{-1}$.

Les résultats d'un essai de pompage dans le sondage à découvert LEB-1, réalisé du 24 juin au 3 juillet 1984 sont donnés dans la figure 21. Les données sur le rabattement en fonction du temps ont été analysées à l'aide du modèle de fracture simple, horizontale, à écoulement uniforme, de Gringarten et Ramey (1974). Ce modèle a été utilisé parce que la courbe log-log de rabattement en fonction du temps présente une pente de 1/2, caractéristique d'un écoulement linéaire, et parce que les résultats d'essais récents avec packers et PIP indiquent que la plus grande partie (60 % à 70 %) du débit de pompage provient d'une zone de fractures sub-horizontales se trouvant approximativement à 87 m de profondeur. La courbe type qui s'ajuste visuellement le mieux aux données de rabattement et de temps est aussi présentée dans la figure 21. Basé sur des estimations de l'épaisseur (h) de la masse rocheuse analysée et de la capacité d'emmagasinage de la masse rocheuse (S), l'ajustement de la courbe type permet d'obtenir des mesures du rayon de la fracture (r_f) et des conductivités hydrauliques anisotropes de la masse rocheuse (K_z, K_r). Un rayon de 45 m, une conductivité verticale de 7×10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ et une conductivité radiale de 1×10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ ont été déterminés à partir du modèle de Gringarten où h = 50 m et $S = 10^{-5}$. Les conductivités hydrauliques radiales calculées sont les mêmes que celles mesurées pendant les essais avec PIP dans la section 0 à 147 m. Les conductivités hydrauliques verticales légèrement plus élevées du modèle dénoteraient des fractures verticales de conductivité élevée près de la surface.

Sondage LEB-2

Les résultats des essais avec packers de 1983 et des essais avec PIP de 1984 sont comparés en termes des valeurs de $Q/\Delta H$ dans la figure 19. Les valeurs de $Q/\Delta H$ sont représentées en termes du logarithme décimal négatif (p) de $Q/\Delta H$, mesuré en mètres carrés par seconde. Les résultats des essais de 1983 et 1984 sont semblables pour les deux premières sections avec PIP de 0 à 250 m de profondeur. Au-dessous de 250 m de profondeur, les essais de 1983 surestiment de beaucoup la valeur de $Q/\Delta H$ de la masse rocheuse. À cause de l'incertitude dans l'estimation des niveaux hydrostatiques pendant les essais de 1983 et de la courte durée des essais de 1983, les résultats des essais avec PIP de 1984 semblent être plus fiables que ceux de 1983.

Les résultats des essais avec PIP de 1984 donnent un rapport $Q/\Delta H$ relativement élevé dans la couche supérieure de roche de 250 m d'épaisseur avec des valeurs de 2×10^{-6} $m^2 \cdot s^{-1}$ (0 à 75 m) et 6×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ (75 à 250 m) et des rapports très faibles $Q/\Delta H$ (4×10^{-10} à 2×10^{-9} $m^2 \cdot s^{-1}$) au-dessous de 250 m de profondeur. Dans les intervalles de 75 à 220 m, les valeurs de $Q/\Delta H$ exprimées en termes de conductivité hydraulique d'une masse rocheuse équivalente (K_{erm}) présentent une diminution logarithmique avec la profondeur, allant de 2×10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ à 2×10^{-12} $m \cdot s^{-1}$.

Le sondage LEB-2 a recoupé plusieurs zones fracturées qui, d'après les diagraphies de sondage et les diagraphies

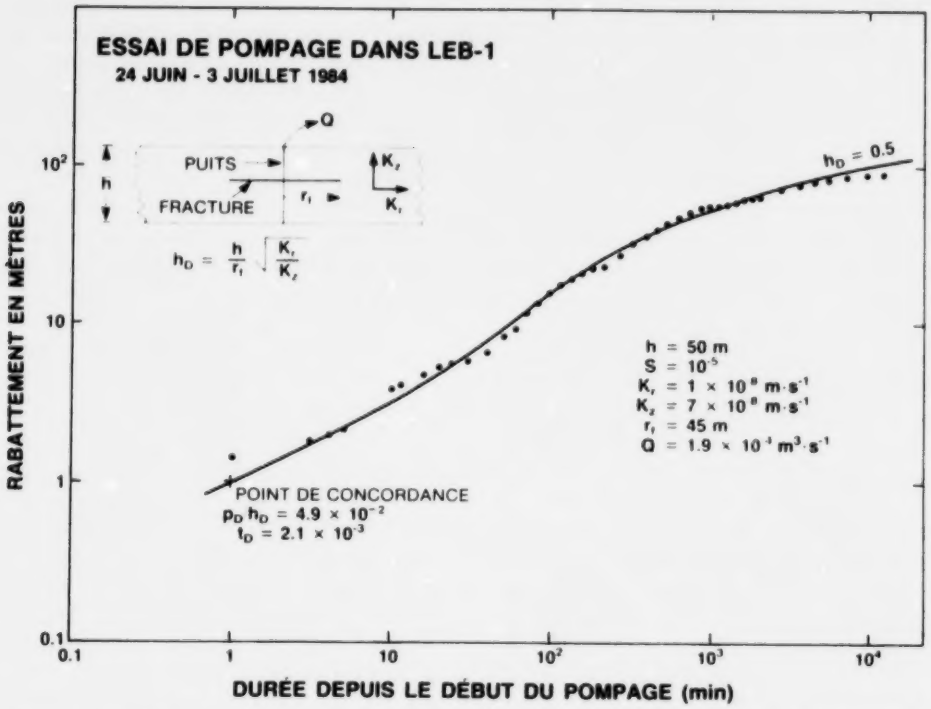

Figure 21. Courbe log-log de rabattement en fonction du temps pour l'essai de pompage dans le sondage à découvert LEB-1. La courbe type des données pour déterminer le rayon de la fracture (r_f) et les conductivités hydrauliques anisotropes (K_r et K_z) de la masse rocheuse est basée sur le modèle de fracture simple, horizontale, à écoulement uniforme, de Gringarten et Ramey (1974).

par image acoustique semblaient être ouvertes. Les résultats des essais d'hydraulique ont toutefois révélé que des fractures de forte conductivité recoupent le sondage seulement dans la couche supérieure de 75 m d'épaisseur, et à 123 et 116 m de profondeur. Au-dessous de 250 m, toutes les fractures ont une faible conductivité hydraulique.

Le sondage LEB-2 recoupe les alignements structuraux 130 et 050 et la base de l'horizon de troctolite. La base de l'horizon de troctolite est recoupée à 122 m de profondeur. L'interprétation hydrogéologique des données disponibles indique que les alignements 130 et 050 sont probablement recoupés à environ 123 m et 355 m de profondeur respectivement. L'alignement 130 et la base de l'unité de troctolite ont un $Q/\Delta H$ combiné compris entre 6 × 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$ (essais avec PIP de 1984) et 1 × 10^{-6} $m^2 \cdot s^{-1}$ (essais avec tubages de 1985). Le rapprochement de ces deux structures empêche de distinguer leurs propriétés hydrauliques individuelles. L'alignement 050 a une faible conductivité hydraulique.

L'essai de pompage à découvert accompli en 1983 a révélé la persistance de l'emmagasinage dans le puits de forage pendant toute la période de pompage. Comme aucune mesure de récupération n'a été enregistrée, il a été impossible d'analyser les données de l'essai de pompage pour déterminer les propriétés hydrauliques.

Sondage LEB-3

Un seul essai d'hydraulique a été fait dans le sondage LEB-3. L'analyse de la récupération au pompage dans le sondage à découvert a donné un $Q/\Delta H$ combiné de 5 × 10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$. Pour une longueur de sondage de 442 m, on obtient une valeur équivalente de K_{erm} de 1 × 10^{-9} $m \cdot s^{-1}$.

Sondage LEB-4

Les résultats des essais avec PIP de 1984 (tableau 6) indiquent que le sondage LEB-4 recoupe plusieurs fractures de forte conductivité hydraulique dans la courbe supérieure de 200 m d'épaisseur et une zone de fractures à 400 m de profondeur.

Des fractures ouvertes se trouvent entre la surface et 50 m de profondeur, à une profondeur de 105 à 117 m et à la base de l'unité de troctolite, à 184 m de profondeur.

Les résultats des essais dans les tubages indiquent que la majorité du fluide produit dans la couche supérieure de 120 m d'épaisseur provient de fractures ouvertes à une profondeur de 105 à 117 m. Ces fractures présentent un rapport $Q/\Delta H$ de 4×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$. Les nombreuses fractures à la base de l'horizon de troctolite expliqueraient la plus grande partie de la valeur de $Q/\Delta H$ (2×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$) mesurée dans la section isolée par PIP 120 à 198 m. Si cette hypothèse est juste, il s'ensuit que le rapport $Q/\Delta H$ pour la base de l'unité de troctolite dans le sondage LEB-4 est semblable aux valeurs mesurées dans le sondage LEB-1 (3×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$) et probable dans le sondage LEB-2 (6×10^{-7} $m^2 \cdot s^{-1}$). La section de 200 à 450 m présente des fractures de conductivité hydraulique essentiellement faible à moyenne. La conductivité hydraulique de la masse rocheuse d'environ 10^{-10} $m \cdot s^{-1}$ est représentative de cette section du sondage.

La structure hydrogéologique la plus importante dans le sondage LEB-4 est une zone fracturée à 454 m de profondeur de conductivité hydraulique élevée à faible charge hydraulique (voir chapitre 6). Les essais avec PIP et ceux avec packers simples de 1984 et les essais dans les tubages de 1985 ont révélé que cette zone fracturée a un rapport $Q/\Delta H$ reproductible de l'ordre de 2 à 3 $\times 10^{-7}$ $m^2 \cdot s^{-1}$.

À cause de cette forte perméabilité et de cette faible charge hydraulique, ajoutées à une forte perméabilité et une charge hydraulique élevée près de la surface, il a été reconnu que d'importantes quantités de fluide descendent dans le sondage LEB-4 et qu'il serait difficile d'y prélever des échantillons d'eau souterraine non contaminée en profondeur. En se basant sur les résultats des essais avec PIP (voir tableau 6) et une estimation des niveaux d'équilibre dans le sondage à découvert (≈8 m de profondeur), on peut estimer que le débit de fluide s'écoulant dans le sondage dans des conditions d'équilibre est de l'ordre de 500 à 600 $mL \cdot min^{-1}$. L'étude débitmétrique du sondage de la United States Geological Survey (USGS) (Paillet et Hess, 1986) de 1984 corrobore de façon indépendante ce calcul du débit et, partant, les propriétés hydrauliques déterminées par les essais avec PIP. Les résultats de l'étude sont donnés dans la figure 22. L'étude montre qu'environ 800 $mL \cdot min^{-1}$ entrent dans le sondage LEB-4 dans la couche supérieure de 150 m d'épaisseur, y descendent et en sortent à la hauteur de la zone fracturée, à 454 m de profondeur. La similarité entre les débits calculés et les mesures indique que les résultats des essais avec PIP pour la zone de fracture à 454 m de profondeur sont fiables.

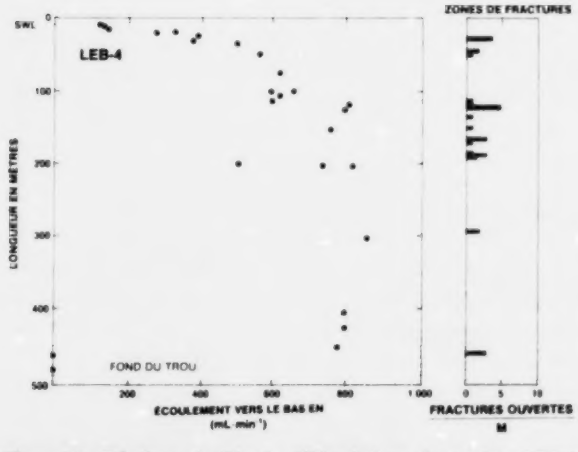

Figure 22. Résultats de l'étude débitmétrique du sondage LEB-4 de la United States Geological Survey, 1984 (Paillet et Hess, 1986).

Le débit de fluide qui descend dans le sondage LEB-4 est aussi confirmé par l'analyse des courbes de conductivité spécifique du fluide soutiré en fonction du volume cumulé de fluide produit (figure 23), obtenues par le pompage répété de la zone fracturée à 454 m de profondeur pour l'échantillonnage géochimique. Vu que les eaux souterraines *in situ* à 454 m de profondeur sont caractérisées par une forte salinité et que les eaux souterraines près de la surface ont une faible salinité, les mesures de la conductivité spécifique du fluide soutiré à 454 m de profondeur reflètent le degré de contamination des eaux souterraines profondes *in situ* par des fluides produits dans la couche supérieure de 150 m d'épaisseur. Comme l'indique la figure 23, une conductivité croissante du fluide a été observée en fonction du volume cumulé de fluide produit, pendant quatre périodes de pompage. Le taux d'augmentation de la conductivité spécifique du fluide soutiré est variable mais, en général, il est directement proportionnel à la période de temps où le sondage est demeuré à découvert ou sans packer, avant le pompage. Par exemple, le sondage LEB-4 a été laissé ouvert pendant des périodes de 15, 60, 3 et 2 jours avant le pistonnage avec PIP, les premier et second pistonnages avec packer simple et «air-lift» avec tubage, respectivement. Le débit dans le sondage pendant ces périodes, basé sur un écoulement en bloc, peut être calculé à partir 1) d'une mesure ou d'une extrapolation du volume de fluide produit nécessaire pendant une des périodes de pompage pour atteindre la conductivité spécifique maximale mesurée pendant les périodes antérieures de pompage 2) de la durée des conditions de sondage à découvert entre les périodes de pompage. En utilisant les données indiquées dans la figure 23, nous pouvons estimer à 50 000 L, 3500 L et 2600 L les volumes nécessaires pour atteindre les conductivités spécifiques maximales antérieures pendant les deux pistonnages avec packer simple et le pompage par «air-lift» avec tubage respectivement. Les données de volume et de temps indiquent que les débits dans le sondage étaient de 580 $mL \cdot min^{-1}$, 800 $mL \cdot min^{-1}$ et

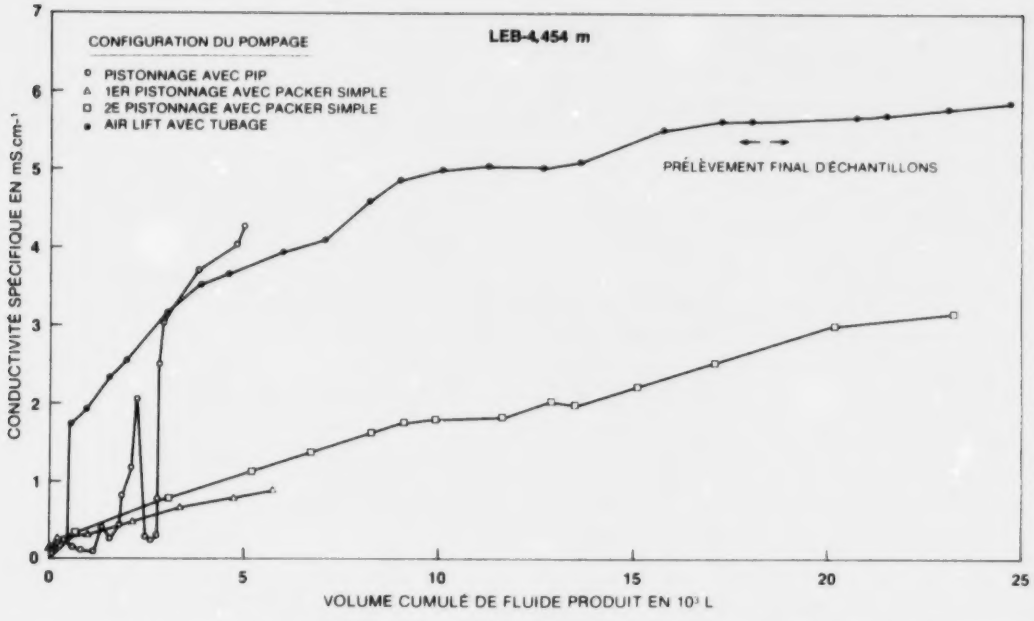

Figure 23. Courbe de la conductivité spécifique du fluide soutiré en fonction du volume cumulé de fluide produit pendant quatre périodes de pompage, dans la zone fracturée à 454 m de profondeur dans le sondage LEB-4.

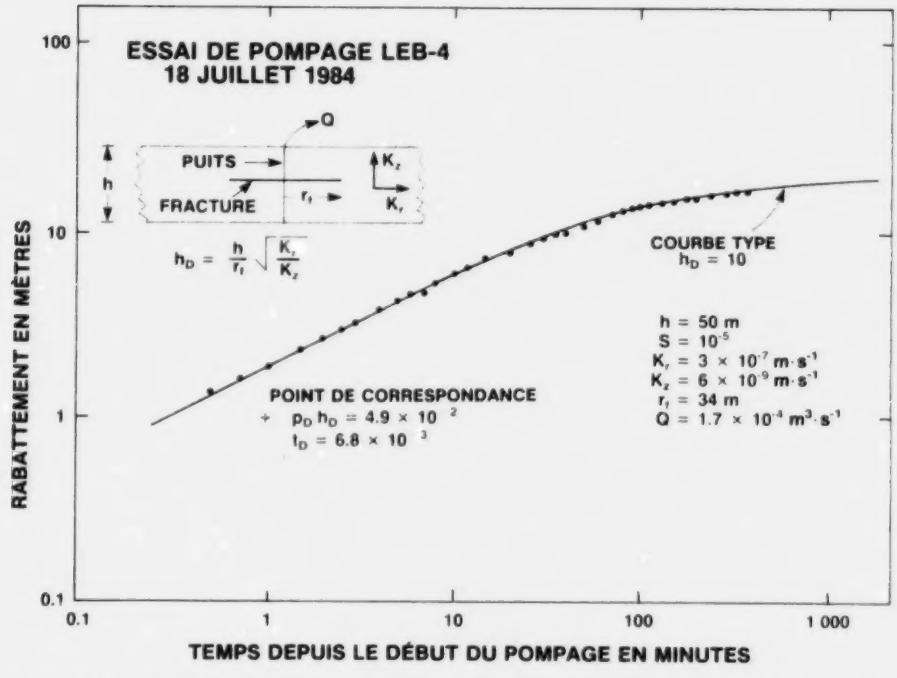

Figure 24. Courbe log-log de rabattement en fonction du temps pour l'essai de pompage dans le sondage à découvert LEB-4. La courbe type servant à déterminer le rayon de la fracture (r_f) et les conductivités hydrauliques anisotropes (K_r et K_z) de la masse rocheuse est basée sur le modèle de fracture simple, horizontale, à écoulement uniforme, de Gringarten et Ramey (1974).

900 mL·min^{-1} entre les trois dernières périodes de pompage, soit des valeurs très voisines de la valeur mesurée par l'USGS (800 mL·min^{-1}). Le faible écart entre les débits dans le sondage est d'autant plus remarquable que le débit mesuré par l'USGS a été obtenu pendant la période de trois jours qui s'est écoulée entre le premier et le second pistonnage avec packer simple. Notre estimation du débit dans le sondage entre ces périodes de pompage est identique, soit 800 mL·min^{-1}.

Les données sur le débit dans le sondage de l'USGS indiquent aussi la présence d'importantes fractures traversées par des fluides à une profondeur de 0 à 50 m et à environ 115 m de profondeur.

Un test de rabattement par étape a été réalisé par pompage dans le sondage LEB-4 en 1984. Les données de rabattement en fonction du temps pour la première étape de pompage sont représentées dans le diagramme log-log de la figure 24. Comme la courbe de rabattement en fonction du temps de la figure 24 a une pente de 1/2, caractéristique d'un écoulement linéaire dans une fracture de conductivité hydraulique élevée, les essais de pompage ont été analysés à l'aide du modèle de Gringarten et Ramey (1974) qui décrit l'écoulement dans des fractures horizontales se trouvant dans une couche anisotrope d'étendue radiale infinie et d'épaisseur finie. Avec une épaisseur (h) de 50 m, une capacité d'emmagasinage (S) continue de 10^{-5} et un débit de pompage de 10 L·min^{-1}, on a obtenu un rayon de fracture de 34 m, et des conductivités hydrauliques anisotropes de $K_r = 3 \times 10^{-7}$ m·s^{-1} et $K_z = 6 \times 10^{-9}$ m·s^{-1} en comparant à partir de la courbe type qui fait correspondre le modèle aux données prises sur le terrain. Comme la plupart du fluide pompé dans le sondage LEB-4 provient des fractures la couche supérieure de 120 m d'épaisseur (probablement entre 0 et 50 m de profondeur), les paramètres dérivés du modèle reflètent les propriétés près de la surface. On s'attend à trouver une plus grande perméabilité radiale à ces faibles profondeurs comme conséquence de la présence de fractures horizontales ouvertes.

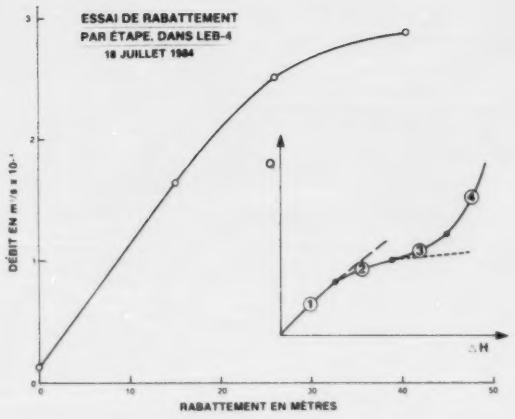

Figure 25. Résultats de l'essai de rabattement par étape dans le sondage LEB-4. La figure en médaillon (d'après Louis et Maini, 1970) montre des résultats types d'essais d'injection de fluide. 1) Écoulement laminaire, 2) effet de turbulence, 3) turbulence compensée par l'expansion de la fissure, 4) prédominance des effets d'expansion de la fissure.

Pendant l'essai de rabattement par étape, on a observé des rabattements et des débits en régime pseudo-permanent. La courbe de débit en fonction du rabattement est représentée dans la figure 25 sous la forme proposée par Louis et Maini (1970) qui permet d'identifier les effets de la turbulence et de la déformation des fractures pendant les essais d'hydraulique dans les roches fracturées. La figure en médaillon, tirée des travaux de Louis et Maini (1970), montre les relations entre le débit potentiel et la charge pendant les essais d'injection par étape. Vu que notre essai par étape a été accompli par soutirage du fluide, les régimes d'écoulement n^{o} 3 et n^{o} 4 dus à l'expansion des fissures sont peu probables. Les données de notre essai dénotent l'existence de turbulence, voire d'effets de fermeture des fractures pour les rabattements supérieurs à environ 20 m. Le débit pour un rabattement nul, indiqué à la figure 25, est le débit dans le sondage, tel que mesuré par le débitmètre de l'USGS.

Installation des tubages à plusieurs packers

Vu les importants débits observés dans le sondage LEB-4 et présumés dans les sondages LEB-1, 2 et 3, il a été reconnu que des mesures fiables de la charge hydraulique et, dans une moindre mesure, de la conductivité hydraulique ainsi que la collecte d'échantillons représentatifs d'eau souterraine ne pourraient être réalisées qu'en isolant à long terme les sections d'essais. En octobre et novembre 1984, des tubages à plusieurs packers gonflés à l'eau, munis d'orifices de pression servant à mesurer la charge hydraulique et d'orifices de pompage pour les essais d'hydraulique et l'échantillonnage de l'eau souterraine ont été installés dans les sondages LEB-1, 2, 3 et 4. L'installation et le fonctionnement de ces tubages ainsi que les profils initiaux de charge hydraulique pour ceux-ci sont résumés dans un rapport de Novakowski et Flavelle (1985).

Tableau 8. Sommaire des installations de tubages à plusieurs packers dans les sondages de la série LEB

	LEB-1	LEB-2	LEB-3	LEB-4
Profondeur (m)	642.0	761.0	256.5	480.0
Packers	31	34	14	30
Orifices de pression	33	34	13	28
Orifices de pompage	29	35	13	25
Sections d'essai	31	30	13	27

Tableau 9. Altitudes des sections d'essai dans les sondages de la série LEB

Section	LEB-1	LEB-2	LEB-3	LEB-4
1	-218.2 to -444.9	-322.3 to -400.1	172.9 to 9.3	-21.0 to -45.1
2	-201.7 to -216.7	-268.3 to -313.8	204.8 to 178.1	8.9 to -15.5
3	-182.2 to -200.2	-238.4 to -266.9	217.9 to 207.2	8.9 to -15.5
4	-132.7 to -180.7	-205.7 to -237.0	237.2 to 219.3	15.7 to -10.2
5	-132.7 to -180.7	-172.8 to -204.3	259.2 to 238.6	33.3 to -17.0
6	-98.2 to -131.2	-154.3 to -171.4	276.0 to 260.6	56.5 to -34.7
7	-63.7 to -96.7	-132.9 to -152.9	292.9 to 277.4	85.2 to -57.9
8	-26.2 to -62.2	-117.1 to -131.5	314.9 to 294.3	103.0 to -86.6
9	-6.7 to -24.7	-87.1 to -115.7	329.3 to 316.3	126.4 to -104.4
10	12.9 to -5.2	-57.1 to -85.6	341.0 to 330.7	144.3 to -127.7
11	41.4 to 14.4	-27.0 to -55.7	358.0 to 342.4	162.2 to -145.7
12	72.9 to 42.9	-1.2 to -25.6	368.4 to 359.4	187.9 to -163.6
13	110.4 to 74.4	40.4 to 0.2	377.6 to 369.9	203.7 to -184.3
14	138.9 to 111.9	64.8 to 41.8		219.0 to -205.1
15	170.4 to 140.4	83.5 to 66.2		225.9 to -220.3
16	186.9 to 171.9	113.7 to 84.9		241.2 to -230.1
17	201.9 to 192.9	143.9 to 115.1		241.2 to -230.1
18	201.9 to 192.9	174.1 to 145.3		256.5 to -245.4
19	206.4 to 203.4	198.6 to 175.5		269.0 to -257.9
20	223.4 to 207.9	228.9 to 200.0		281.6 to -270.4
21	245.4 to 224.4	247.6 to 230.3		294.1 to -282.9
22	266.4 to 246.9	272.2 to 249.0		306.6 to -295.5
23	282.9 to 267.9	290.9 to 276.5		322.0 to -308.0
24	302.4 to 284.4	290.9 to 276.5		334.6 to -323.4
25	311.4 to 303.9	301.0 to 292.3		352.7 to -336.0
26	323.4 to 312.9	314.4 to 302.4		368.1 to -354.1
27	342.9 to 324.9	329.9 to 315.4		380.7 to -369.5
28	353.4 to 344.4	347.2 to 331.3		390.5 to -382.1
29	369.9 to 354.9	347.2 to 331.3		397.5 to -391.9
30	378.9 to 371.4	357.3 to 348.6		
31	386.4 to 380.4	367.4 to 358.7		
32	393.9 to 387.9	374.7 to 368.8		
33	405.8 to 395.4	381.9 to 376.1		
34		387.7 to 383.3		

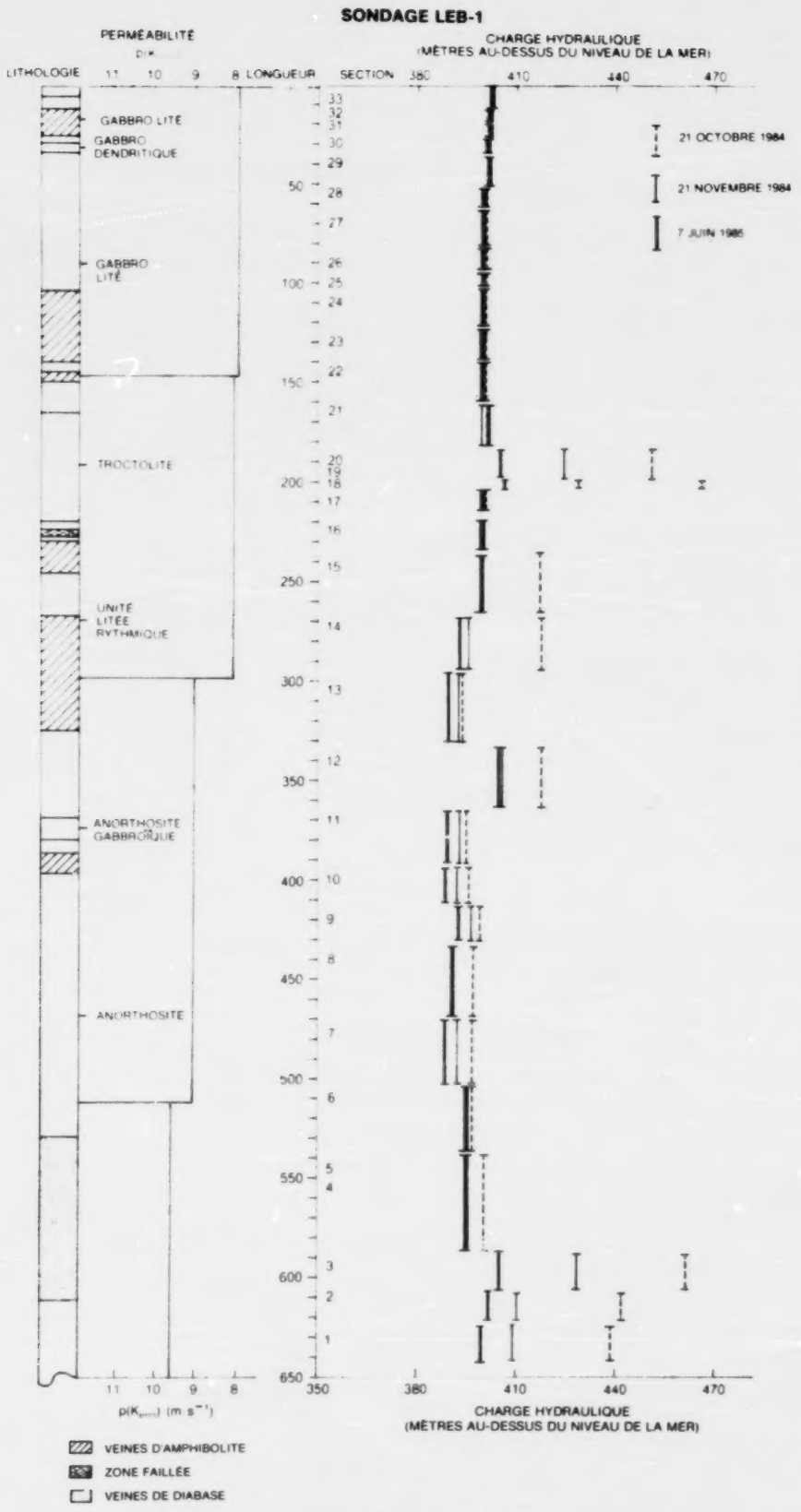

Figure 26. Coupe lithologique et hydrogéologique combinée pour le sondage LEB-1; les données lithologiques proviennent des diagraphies du sondage, les données sur la perméabilité, des essais à PIP, et les données sur la charge hydraulique, des profils de pression dans les tubages à plusieurs packers.

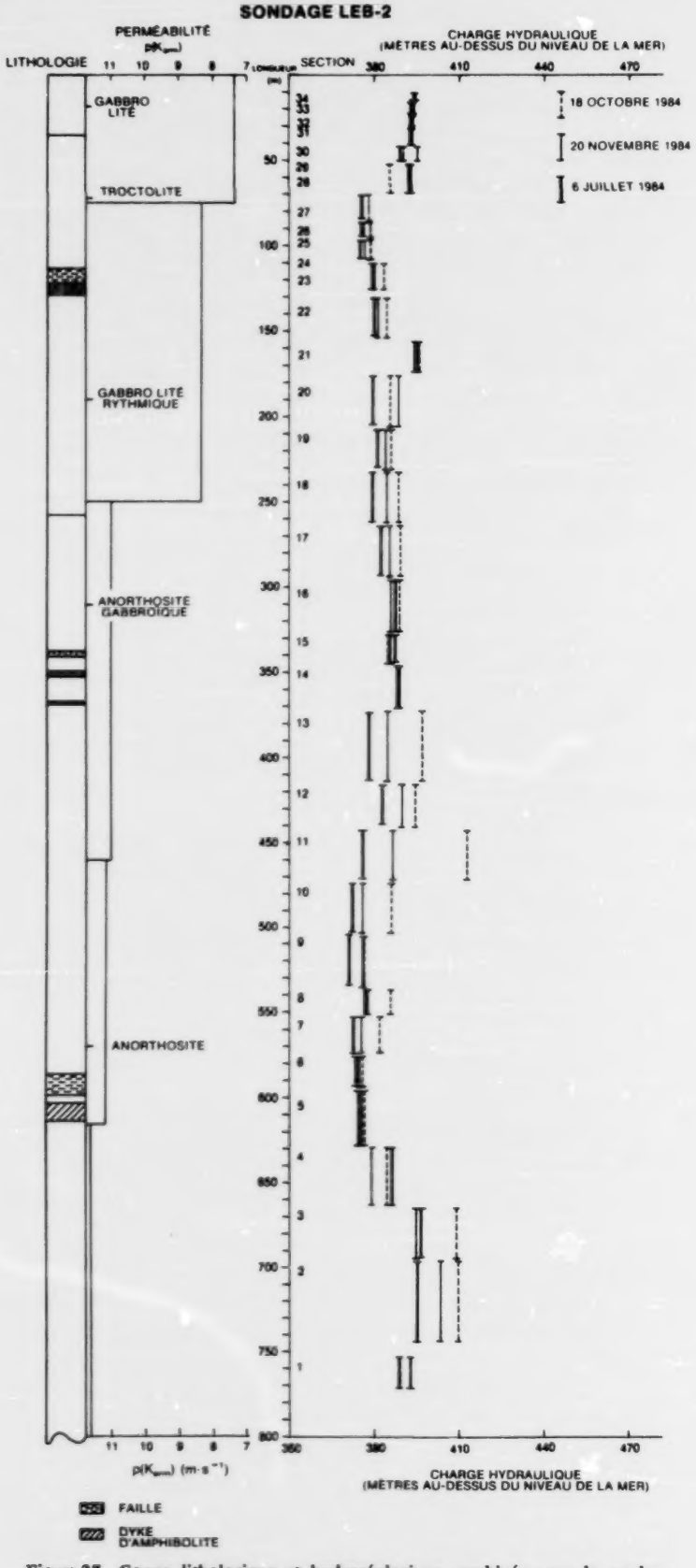

Figure 27. Coupe lithologique et hydrogéologique combinée pour le sondage LEB-2; les données lithologiques proviennent des diagraphies du sondage, les données sur la perméabilité, des essais à PIP, et les données sur la charge hydraulique, des profils de pression dans les tubages à plusieurs packers.

La profondeur de l'installation ainsi que le nombre de packers, d'orifices de pression et de pompage et de sections d'essai pour chaque sondage sont donnés dans le tableau 8. Les altitudes des sections d'essai dans chaque sondage sont résumées au tableau 9. Les altitudes de chaque section d'essai ont été déterminées à partir de l'altitude du sommet du tubage de surface de chaque sondage et des résultats des levés gyroscopiques de direction des sondages de Sperry Sun of Canada Ltd. La distribution des sections d'essai dans chaque sondage est indiquée dans les figures 26 à 29 et décrite en détail par Novakowski et Flavelle (1985).

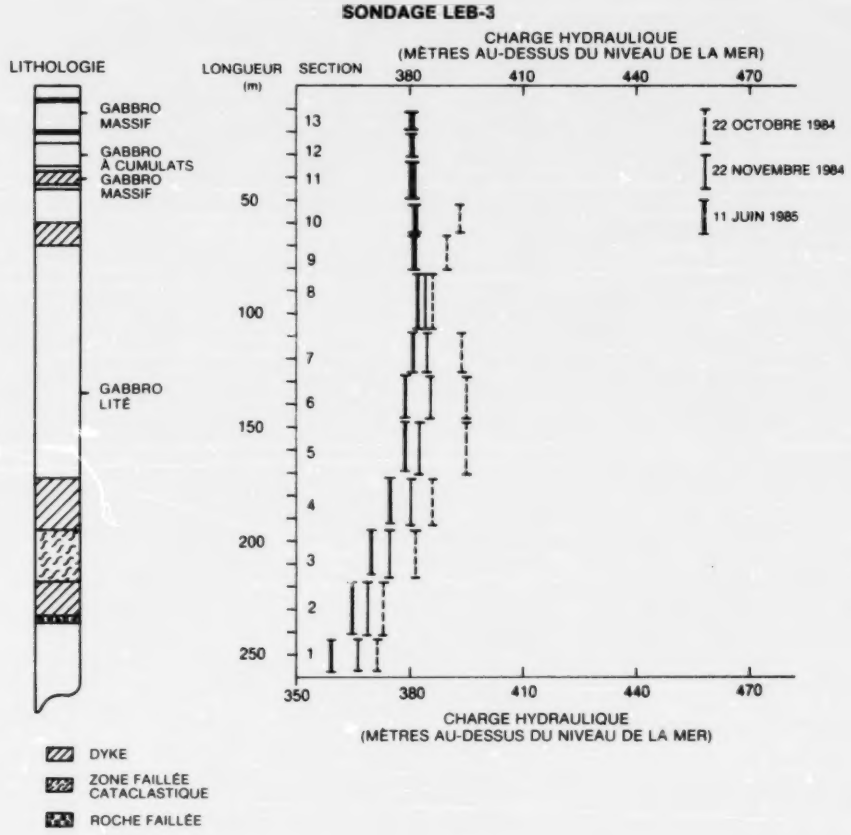

Figure 28. Coupe lithologique et hydrogéologique combinée pour le sondage LEB-3; les données lithologiques proviennent des diagraphies du sondage, les données sur la charge hydraulique, des profils de pression dans les tubages à plusieurs packers.

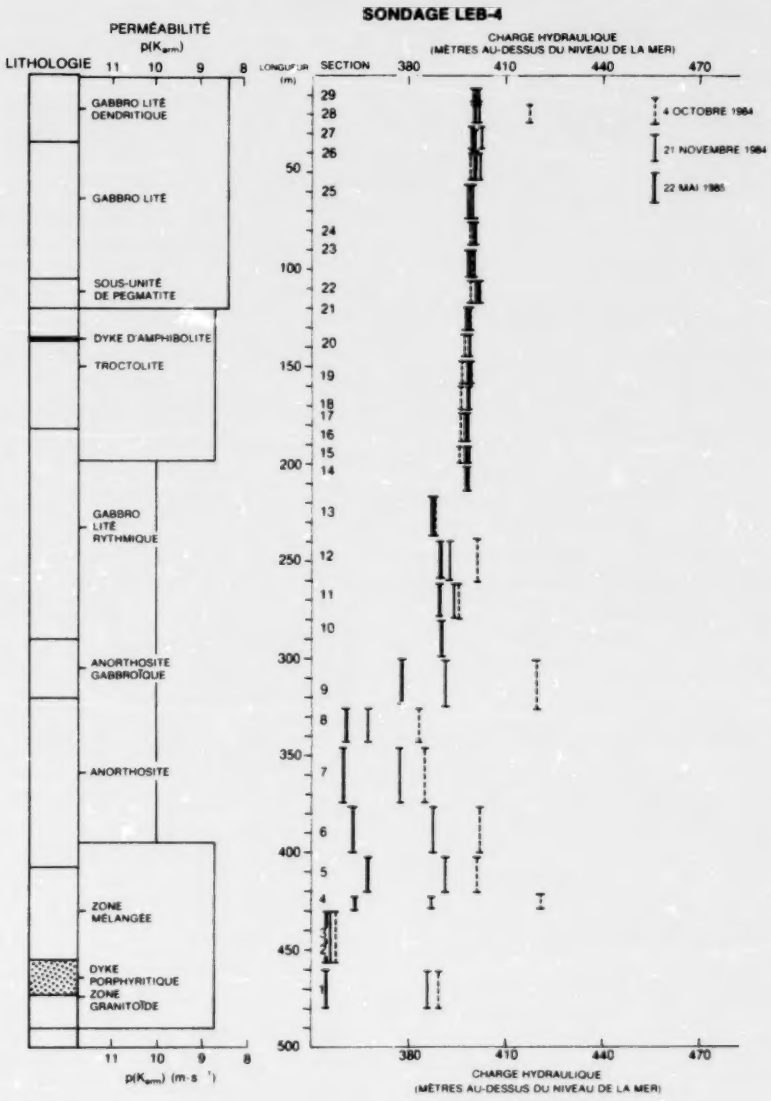

Figure 29. Coupe lithologique et hydrogéologique combinée pour le sondage LEB-4; les données lithologiques proviennent des diagraphies du sondage, les données sur la charge hydraulique, des profils de pression dans les tubages à plusieurs packers.

Contrôle de la charge hydraulique

MÉTHODE

Des mesures de la charge hydraulique ont été prises dans les sondages des séries P et LEB, tant à découvert que dans des sections d'essai isolées par packers. Les charges hydrauliques ont été déterminées soit à partir du niveau des fluides, soit à partir des mesures de pression des fluides et des données d'altitude obtenues à partir du niveau en surface et des levés de direction des sondages. Les mesures de niveau ont été prises au moyen d'un ruban limnimétrique à contacts électriques d'une précision de ±5 mm. Les mesures de pression ont été faites au moyen d'une sonde de pression submersible ayant une précision de ±0.10 m.

Les charges hydrauliques dans les sondages de la série P ont été déterminées à partir de mesure de niveau. Dans les sondages de la série LEB, elles ont été déterminées 1) à partir de mesures de niveau tant dans les sondages à découvert que dans des sections d'essai isolées par PIP et par packers 2) à partir de mesures de pression dans les tubages à plusieurs packers.

L'interprétation de l'écoulement de l'eau souterraine dans des systèmes comportant des fluides de densité variable doit reposer sur la détermination de charges équivalentes d'eau douce et d'eau ambiante (Lusczynski, 1961; Jorgensen et coll., 1982). On estime que les charges hydrauliques basées sur les mesures de niveau obtenues dans les sondages de la série P et la couche supérieure de 300 m d'épaisseur des sondages de la série LEB représentent des charges équivalentes d'eau douce et d'eau ambiante vu les faibles concentrations en solides dissous totaux (chapitre 7) et, partant, la densité relativement uniforme des échantillons d'eau souterraine. La salinité et la densité de l'eau souterraine en-dessous de 300 à 400 m augmentent avec la profondeur. Les charges hydrauliques pour des sections d'essai de telle profondeur doivent être converties en charges équivalentes d'eau douce pour la détermination des potentiels de l'écoulement horizontal et en charges d'eau ambiante pour la détermination des potentiels de l'écoulement vertical. Vu qu'on mesure des pressions et non des niveaux lorsqu'on utilise le système des tubages à plusieurs packers, les charges hydrauliques calculées à partir du contrôle des tubages tiennent compte des effets des fluides de densité variable et représentent donc des hauteurs équivalentes d'eau douce. Les mesures de la densité des fluides sont nécessaires pour convertir les charges d'eau douce en charges d'eau ambiante (Lusczynski, 1961).

Le programme le plus complet de contrôle de la charge hydraulique a été réalisé dans les sondages de la série LEB, au moyen des tubages à plusieurs packers, d'octobre 1984 à octobre 1985. Quinze ou seize profils de pression complets ont été obtenus pour chaque sondage pendant cette période d'un an. Pendant qu'on établissait les profils de pression des sondages LEB-1, 2 et 3, le tubage en plastique a été rempli d'eau jusqu'à la surface et la charge hydraulique a été déterminée à partir de l'altitude de l'orifice de pression et de la différence de pression entre l'intérieur du tubage rempli d'eau et la section d'essai. À cause d'une fuite importante dans le tubage en plastique, en profondeur dans le sondage LEB-4, il a été impossible de maintenir le niveau au sommet du tubage pendant qu'on établissait les profils de pression. Les charges hydrauliques dans le sondage LEB-4 ont donc été calculées à partir des données d'altitude et des relevés de pression absolue dans la section d'essai, telles que corrigées pour tenir compte de la température dans le sondage.

L'intégrité du tubage et la fiabilité des charges hydrauliques calculées ont été vérifiées dans les sondages LEB-1 et LEB-2 en octobre 1985. Des profils de pression ont été établis pour chaque section d'essai, le niveau dans le tubage étant maintenu à la surface, puis entre 8 et 23 m en profondeur. En comparant les deux profils de pression, on a identifié des sections d'essais qui communiquaient hydrauliquement avec l'intérieur du tubage, et donc des charges hydrauliques non représentatives et excessivement élevées.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Sondages de la série P

Des charges hydrauliques ont été calculées pour les sondages de la série P tant dans les sondages à découvert que dans des sections d'essai isolées par packers. Les niveaux dans les sondages à découvert variaient généralement entre 1.0 et 3.0 m sous la surface du sol.

Les estimations les plus fiables de la hauteur piézométrique dans les sondages de la série P ont été obtenues à partir des résultats des essais avec packers simples et avec packers doubles. Les résultats pour les sections d'essai de 4 m de long sont présentés sous forme de tableaux à l'annexe A. Ces charges hydrauliques devraient être considérées comme étant approximatives car les packers doubles ont isolé les sections d'essai pendant des périodes relativement courtes (de plusieurs heures à plusieurs jours) par rapport au temps pendant lequel les sondages ont été laissés à découvert (c'est-à-dire plusieurs mois). Toutefois, le profil approché de la charge hydraulique, tel qu'établi à partir des essais avec packers doubles fournit des renseignements importants sur la circulation des eaux souterraines autour de chaque sondage.

La distribution de la charge hydraulique dans la zone des sondages P-1 à P-6 est déterminée par les alignements 050 et 130. Ces discontinuités structurales ont des conductivités hydrauliques supérieures à celles de la masse rocheuse environnante et agissent comme des drains ou des sources dans le réseau des eaux souterraines au voisinage de chaque sondage. Les sondages P-1, 3 et 4 recoupent l'alignement 130 et présentent des gradients vers le haut de 3×10^{-2} à 9×10^{-2}, de l'alignement à la surface. L'alignement 130 recouperait aussi le sondage LEB-2 à environ 123 m de profondeur; à cette profondeur, la charge hydraulique est de 3 à 4 m supérieure à celle dans les sections d'essai sus-jacentes ce qui indique que l'eau souterraine de surface est canalisée jusqu'en profondeur le long de l'alignement. De même, l'eau souterraine s'écoule vers le haut, avec des gradients d'environ 1×10^{-2}, là où l'alignement 050 recoupe les sondages P-2 et P-5. Toutefois, là où elle recoupe les sondages P-6 et P-8, l'alignement 050 se comporte aussi comme un drain pour l'eau souterraine des roches tant sus-jacentes que sous-jacentes, avec des gradients de 4×10^{-2} à 6×10^{-1}. Ce comportement mixte source – puits par rapport à la masse rocheuse environnante suggère que des régimes complexes d'écoulement vertical sont probables dans les deux discontinuités structurales.

La direction horizontale approximative de l'écoulement dans chaque alignement structural peut toutefois être estimée par comparaison des charges hydrauliques dans chaque sondage et si on suppose que les alignements sont hydrauliquement continus. Les charges hydrauliques (tableau 10) indiquent que l'eau souterraine s'écoule le long de chaque alignement ce qui est conforme à la topographie et au drainage en surface (voir section sur Modèle de drainage de surface au chapitre 2), où les eaux se dirigent vers le nord-est le long de l'alignement 050 et vers le sud-est le long de l'alignement 130.

L'écoulement des eaux souterraines dans la masse rocheuse peu profonde (0 à 50 m de profondeur) de la moitié nord du plateau reflète aussi la topographie de surface. Elles descendent vers les dépressions topographiques créées par les alignements structuraux 050 et 130 (figure 31 au chapitre 7).

Tableau 10. Charges hydrauliques dans les structures des alignements 050 et 130 et à la base de l'horizon de troctolite

Sondage	Profondeur approximative de recoupement (m)	Charge hydraulique*
Alignement 050		
P-2	25.0–34.6	392
P-5	88.5–97.6	395
P-6	41.0–49.5	372
P-8	34.4–38.5	398
P-14	23.9–28.8	360
Alignement 130		
P-1	35.3–42.0	393
P-3	17.0–31.8	392
P-4	42.0–54.0	391
LEB-2	122.0–124.0	379
Base de l'horizon de troctolite		
LEB-1	210	399.8
LEB-2	122	379.7
LEB-4	184	398.0

* En mètres au-dessus du niveau de la mer.

Les charges hydrauliques mesurées dans les sondages P-12 et P-13 qui recoupent les ramifications de la faille du lac Folson montrent qu'il y a un écoulement vertical vers le bas ayant des gradients de 1×10^{-2} à 3×10^{-2}.

L'écoulement des eaux souterraines dans les zones exemptes d'alignements structuraux importants dénote aussi une forte composante de recharge. Des gradients verticaux de 1×10^{-2} à 3×10^{-2} ont été observés dans les sondages P-7, 9, 10 et 11.

Sondages de la série LEB

Les niveaux dans les sondages à découvert LEB-1, 2, 3 et 4 etaient en moyenne de 6.0 m, 14.0 m, 10.0 m et 8.0 m au-dessous de la surface du sol respectivement en 1983 et 1984.

Les charges hydrauliques mesurées pendant les essais avec PIP en 1984 sont présentées dans le tableau 11. Elles ont été déterminées à partir de mesures de niveau prises peu de temps après qu'on ait accédé à chaque section isolée par PIP. Les charges hydrauliques mesurées dans la plupart des sections isolées par PIP sont considérées comme représentatives car les sections d'essai ont été hydrauliquement isolées pendant des périodes de 7 à 8 mois avant les mesures. Les données pour les sections d'essai LEB 2-1

et 2-2 sont moins fiables à cause des fuites dans les PIP et de la très faible perméabilité des sections.

Tableau 11. Charges hydrauliques mesurées pendant les essais avec PIP de 1984

Section	Profondeur (m)	Charge hydraulique†
LEB 1-5	0-147	401.9
LEB 1-4	147-298	399.9
LEB 1-3	298-512	394.8
LEB 1-2	512-650	388.8
LEB 1-1	650-851	Pas atteint
LEB 2-5	0-75	394.4
LEB 2-4	75-250	377.5
LEB 2-3	250-460	368.8
LEB 2-2	460-616	368.8*
LEB 2-1	616-836	368.8*
LEB-3	0-442	378.9
LEB 4-4	0-120	401.8
LEB 4-3	120-198	399.8
LEB 4-2	198-396	385.2
LEB 4-1	396-489	367.2

* Données approximatives à cause de la courte période d'observation et de la faible perméabilité de la section d'essai.
† Mètres au-dessus du niveau de la mer.

Les charges hydrauliques mesurées en 1984 indiquent que les gradients de recharge verticaux sont de 1×10^{-2}, 3×10^{-1} et 2×10^{-2} dans la couche supérieure de 200 m d'épaisseur des sondages LEB-1, 2 et 4 respectivement. Entre 200 et 400 m de profondeur, les gradients verticaux augmentent dans les sondages LEB-1 et LEB-4 à 5×10^{-2} et 3×10^{-1} respectivement. Les gradients horizontaux dans la région définie par les sondages LEB-1, 2 et 4 sont en moyenne de 3×10^{-2} vers le nord-est dans la couche supérieure de 200 m d'épaisseur et de 5×10^{-2} vers le sud-est entre 200 et 400 m de profondeur. Les gradients au-dessous de 400 à 500 m sont moins définis car les données sont insuffisantes.

La charge hydraulique a été contrôlée dans les sondages LEB-1, 2, 3 et 4 d'octobre 1984 à octobre 1985. Les résultats de ce contrôle de la hauteur de charge sont présentés sous forme de tableau à l'annexe B, et représentent les charges hydrauliques d'eau douce. Les résultats d'études choisie sont aussi présentés parallèlement aux coupes lithologiques et de perméabilité ou de conductivité hydraulique (des essais avec PIP) dans les figures 25 à 29. Les profils de charge hydraulique d'eau douce sont cotés en mètres au-dessus du niveau de la mer. Les deux premières études, réalisées après le gonflage des packers, et une troisième étude, effectuée vers la fin du printemps avant le prélèvement par pompage d'échantillons d'eau souterraine, sont présentées dans les figures 26 à 29.

Les profils de charge hydraulique des sondages LEB-1 et LEB-2, tels qu'illustrés dans les figures 26 et 27, présentent des gradients vers le bas jusqu'à environ 500 m de profondeur et des gradients vers le haut en-dessous de 500 m. Les profils des sondages LEB-3 et 4 indiquent un gradient croissant vers le bas à partir de la surface jusqu'à la base des tubages, à 256.5 m et 480.0 m de profondeur.

La variabilité des mesures de charge entre 200 et 500 m et les gradients vers le haut au-dessous de 500 m dans les deux sondages LEB-1 et 2, ont imposé une vérification de l'intégrité des tubages dans ces sondages. Les résultats de cette vérification sont présentés dans le tableau 12. Celui-ci montre la variation de la hauteur de charge dans la section d'essai entre deux profils de pression successifs l'un réalisé avec un niveau de 8 à 23 m au-dessous du sommet du

Tableau 12. Résultats de la vérification de l'intégrité des tubages à plusieurs packers dans les sondages LEB-1 et LEB-2

	Variation de la hauteur de charge en pourcent*	
Intervalle	LEB-1	LEB-2
1	55	17
2	64	–
3	71	64
4	27	–
5	27	19
6	24	1
7	0	7
8	1	29
9	20	0
10	17	24
11	0	37
12	100	86
13	8	71
14	58	80
15	16	73
16	0	73
17	0	51
18	0	0
19	13	5
20	19	2
21	11	8
22	1	0
23	0	0
24	0	0
25	0	0
26	0	0
27	0	0
28	0	12
29	0	12
30	0	30
31	0	1
32	0	0
33	0	1
34	–	4

* Variation de la hauteur de charge dans la section d'essai, en pourcentage de la variation de niveau dans le tubage. Les variations de niveau dans les tubages entre les deux levés étaient de 15 à 23 m pour le sondage LEB-1 et de 8 à 16 m pour le sondage LEB-2.

tubage, et l'autre, avec un niveau au sommet du tubage. La variation de la hauteur de charge dans la section d'essai est exprimée en fonction de la variation de niveau dans le tubage entre les deux levés. Dans les sections où les variations de hauteur de charge sont négligeables, on considère que les charges hydrauliques sont fiables. Vu qu'un peu de fluide s'est probablement déplacé entre l'intérieur du tubage et la section d'essai pendant la mise en place de la sonde de pression, une variation maximale de 10 % dans la lecture de la hauteur de charge, ou 1 à 2 m est aussi considérée comme une mesure raisonnable mais moins fiable. Des variations de 10 à 50 % entre les levés indiquent que la charge hydraulique dans la section reflète à la fois le niveau dans le tubage et les conditions hydrauliques *in situ*. Des variations supérieures à 50 % indiquent qu'il y a une fuite entre le tubage et la section d'essai et que les mesures de la charge hydraulique dans la section d'essai ne sont pas fiables. Vu que la plupart des profils de pression ont été établis avec le niveau du fluide au sommet du tubage, les charges hydrauliques calculées dans les sections où la hauteur de charge a varié pendant la vérification de l'intégrité seront toujours plus élevées que les charges hydrauliques réelles ou *in situ*.

Les résultats de la vérification d'intégrité et les profils de pression dans le sondage LEB-1 montrent que dans la couche supérieure de 200 m d'épaisseur de l'installation les charges hydrauliques sont fiables avec des gradients vers le bas uniformes de 1 à 2 $\times 10^{-2}$, mais que seulement quelque sections d'essai au-dessous de 250 m (soit n^{os} 7, 11 et 13) fournissent des données fiables. Aucune donnée de charge hydraulique n'est fiable pour le sondage LEB-1 au-dessous de 500 m. Les quelques mesures fiables de charge hydraulique entre 250 et 500 m révèlent des gradients de recharge verticaux de l'ordre de 5 $\times 10^{-2}$.

Les charges hydrauliques dans le sondage LEB-2 ont une distribution plus variable dans la couche supérieure de 200 m d'épaisseur, ce qui dénote probablement la présence d'importants alignements structuraux et de fractures associées. On note de forts gradients de recharge de 3 $\times 10^{-1}$ jusqu'à 75 m de profondeur, et de forts gradients de décharge ou d'écoulement vers le haut de 2 $\times 10^{-1}$ de 75 à 170 m. La composante verticale du gradient hydraulique est dirigée vers le bas de 170 à 260 m de profondeur. Entre 260 et 500 m de profondeur, les charges hydrauliques ne sont généralement pas fiables, se situant entre 50 % et 85 % de la hauteur de charge pendant la vérification de l'intégrité du tubage. Le grand nombre de sections d'essai peu fiables dans cette partie du sondage peut être lié à la très faible perméabilité de la roche.

Des données de charge hydraulique ont été obtenues dans les sections d'essai n^{os} 6, 7 et 9 du sondage LEB-2, entre 500 et 600 m de profondeur. Une valeur raisonnable de la charge hydraulique a été aussi mesurée dans la section d'essai n^{o} 1 au fond du sondage LEB-2. Les données disponibles sur la charge hydraulique pour le sondage LEB-2, au-dessous de 250 m, indiquent des gradients vers le bas de l'ordre de 3 $\times 10^{-2}$ entre 250 m et 500 m et des gradients vers le haut d'environ 6 $\times 10^{-2}$ dans la section de 500 à 836 m. La section d'essai n^{o} 1 dans le sondage LEB-2, qui commence à 753 m de profondeur est ouverte sur le fond du sondage à 836 m.

Les charges hydrauliques mesurées dans le sondage LEB-3 (figure 28) indiquent des gradients verticaux négligeables dans la couche supérieure de 100 m d'épaisseur et de forts gradients de recharge de 1 $\times 10^{-1}$ au-dessous de 100 m de profondeur. La section d'essai la plus basse (n^{o} 1) comprend la partie ouverte du sondage LEB-3, de 250 à 442 m de profondeur. Même si les gradients vers le bas observés dans la section 100 à 250 m se maintiennent en profondeur, la charge hydraulique la plus basse associée avec la faille du lac Folson est probablement inférieure à la valeur mesurée pour la section d'essai n^{o} 1, à 357.7 m au-dessus du niveau de la mer. Ceci est dû au fait que la charge de 357.7 m est une valeur moyenne pour la section de 250 à 442 m et reflète probablement une charge hydraulique supérieure dans le haut de la section et inférieure dans le bas.

Les charges hydrauliques mesurées dans le sondage LEB-4 après le 22 mai 1985 l'ont été après des périodes de pompage en vue de prélever des échantillons d'eau souterraine. Les sections n^{o} 2 et n^{o} 3 (ayant 429 à 456 m de profondeur) ont été particulièrement sollicitées (26 000 L prélevés) pendant la période du 4 juin au 4 août 1985. Environ 4000 L ont été retirés de la section n^{o} 22 (ayant 105 à 117 m de profondeur) pendant la période du 3 au 9 octobre 1985. Les rabattements dus à ces soutirages sont perceptibles dans les levés de charge hydraulique accomplis le 18 août, le 20 septembre et le 23 octobre 1985.

Le meilleur levé de charge hydraulique dans le sondage LEB-4, a été obtenu le 22 mai 1985 et est présenté dans la figure 29. La couche supérieure de 200 m d'épaisseur du sondage LEB-4 présente des gradients de recharge verticaux relativement uniformes de 1 à 2 $\times 10^{-2}$, semblables à ceux du sondage LEB-1, mais différents de ceux du sondage LEB-2. Les gradients uniformes du sondage LEB-4 jusqu'à 200 m de profondeur reflètent l'absence d'importantes discontinuités structurales près de la surface. Au-dessous de 200 m de profondeur, la distribution de la hauteur piézométrique dénote la présence d'une zone fracturée de faible charge hydraulique et de forte perméabilité, associée à un dyke porphyritique au contact basal du pluton mafique du lac East Bull. Des gradients verticaux

de 1 à 3 x 10^{-1} sont observés à partir de 200 m de profondeur jusqu'à la zone de fracture à 454 m de profondeur. Une charge hydraulique d'environ 352 m au-dessus du niveau de la mer a été mesurée dans cette zone fracturée le 22 mai 1985. Cette charge est la valeur d'équilibre la plus basse relevée dans tous les sondages du lac East Bull; elle est inférieure à l'altitude du lac Moon adjacent à environ 355 m au-dessus du niveau de la mer (figure 2). La figure 2 montre aussi que le lieu de décharge potentiel le plus proche pour cette zone de fractures de faible charge hydraulique a la même direction que la faille du lac Folson au voisinage immédiat du lac Parisien (altitude d'environ 339 m au-dessus du niveau de la mer). Le lac Parisien est situé à environ 2.5 km au sud-est du sondage LEB-4.

Les résultats du contrôle de la charge hydraulique dans les sondages de la série LEB permettent d'évaluer les directions à peu près horizontales d'écoulement de l'eau souterraine dans la zone supérieure du plateau du pluton du lac East Bull. En plus de renseigner sur les conditions de recharge générales, décrites auparavant, les données sur la charge hydraulique dans les sondages LEB-1, 2 et 4 indiquent que l'eau souterraine dans la couche supérieure de 200 m d'épaisseur de la zone de ces sondages s'écoule vers le nord-est jusqu'à l'intersection des alignements 050 et 130, avec un gradient de 3 x 10^{-2}. Ce résultat concorde avec les directions d'écoulement établies d'après les charges hydrauliques obtenues à partir des sondages de la série P (figure 31). L'écoulement de l'eau souterraine dans la couche supérieure de 200 m d'épaisseur de la moitié sud de la zone supérieure du plateau concorde aussi avec le drainage de surface et la topographie, avec des gradients horizontaux dirigés vers la faille du lac Folson.

Les mesures de la charge hydraulique dans les fractures très perméables associées à la base de l'horizon de troctolite (tableau 10) présentent aussi un gradient hydraulique d'environ 5 x 10^{-2} dirigé vers le nord-est. À cause de la perméabilité uniforme et élevée à la base de l'horizon de troctolite, il est probable que l'eau souterraine vient de la roche du fond sus-jacente, longe la base du troctolite sans rencontrer beaucoup de résistance et se décharge en surface là où l'unité affleure dans la dépression topographique entre l'extrémité nord du lac Moon et le lac Little Bull.

Entre 200 et 400 à 500 m de profondeur, les gradients hydrauliques horizontaux dans la zone étudiée sont dirigés vers le sud et le sud-est probablement du côté de la faille du lac Folson, avec une valeur moyenne de 5 x 10^{-2}. Les charges et les gradients hydrauliques mesurés dans la couche supérieure de 400 à 500 m d'épaisseur de la zone étudiée pendant l'établissement des profils de pression en 1985 sont généralement semblables à ceux mesurés pendant les essais avec PIP de 1984.

Sous des profondeurs de 400 à 500 m, la direction horizontale de l'écoulement de l'eau souterraine est moins certaine vu le manque de mesures fiables de la charge hydraulique. On pense que l'eau souterraine au voisinage du sondage LEB-4 s'écoule le long du dyke porphyritique fracturé recoupé à 454 m de profondeur par le sondage LEB-4 et vers la faille du lac Folson. Les données hydrogéologiques disponibles indiquent en outre que la faille du lac Folson constitue une voie régionale très perméable qui canalise l'écoulement dans la direction sud-est de la faille. Si une importante partie de l'écoulement longe effectivement la faille à partir du pluton du lac East Bull, la diminution d'altitude observée vers le sud-est dans l'axe de la faille pourrait donner lieu à une décharge d'eau souterraine, de la faille vers la région du lac Parisien. Lee (1983) a mesuré le débit d'eau souterraine qui se déverse dans le lac Parisien et a aussi établi que le débit d'eau de surface sortant du lac est beaucoup plus important que celui qui y entre. Bien que les données de Lee n'indiquent pas clairement que l'eau souterraine se déverse de la faille du lac Folson dans le lac Parisien, ces données ainsi que les renseignements hydrogéologiques obtenus dans les sondages LEB montrent qu'une telle circulation d'eau souterraine est probable.

Recherches hydrogéochimiques

Dans le cadre du programme de gestion des déchets de combustibles nucléaires de l'EACL, la zone de recherches du lac East Bull est unique car c'est la seule zone de recherches où il est possible d'étudier les caractéristiques hydrogéologiques d'une grande masse de roche plutonique mafique (gabbro-anorthosite) à l'intérieur du Bouclier précambrien canadien. La zone LEB permet notamment d'étudier les caractéristiques hydrogéochimiques et les processus d'évolution des roches mafiques et de comparer de tels processus à ceux qui se produisent dans les roches granitiques déjà étudiés au pays et ailleurs. Ces renseignements hydrogéochimiques généraux devraient faciliter la tâche du gouvernement dans son examen du document de l'EACL sur l'évaluation du principe de l'évacuation des déchets nucléaires très concentrés dans les roches plutoniques du Bouclier précambrien.

En 1984, une étude hydrogéochimique conjointe INRH-EACL a été entreprise pour établir la composition chimique et isotopique des eaux souterraines, du pluton du LEB dans le plan tant horizontal que vertical. L'étude a été réalisée par échantillonnage d'une ou plusieurs zones dans chacun des quatorze sondages à percussion peu profonds (< 100 m de profondeur) de la série P, et par échantillonnage de zones dans trois des quatre sondages profonds de la série LEB dans lesquelles des packers d'injection-production (PIP) avaient été installés à l'automne 1983. Des PIP ont été placés à 147, 298, 512 et 650 m dans LEB-1; 75, 250, 460 et 616 m dans LEB-2; et 120, 198 et 396 m dans LEB-4. Aucun PIP n'avait été installé dans LEB-3. L'échantillonnage de ces zones isolées par PIP a été fait avant l'enlèvement des PIP en vue de la réalisation de diagraphies géophysiques des sondages et de l'installation des tubages.

Le PIP à 250 m dans LEB-2 s'était un peu dégonflé depuis son installation, puis est tombé sur le PIP à 460 m. Le PIP a été retiré, puis réinstallé à 248 m avant l'échantillonnage. De même le PIP à 460 m n'était pas assez gonflé et a dû être remplacé avant l'échantillonnage. Ainsi la section de 75 à 616 m du sondage LEB-2 peut avoir communiqué hydrauliquement avec l'extérieur pendant une période considérable bien qu'on ne sache pas quand les PIP se sont dégonflés à 250 m et 460 m. Les mesures de débit de l'USGS ont indiqué un écoulement vers le bas atteignant 300 et 800 $mL \cdot mn^{-1}$ dans LEB-2 et LEB-4 respectivement Il y a donc eu mélange vertical dans ces sondages pendant que les principales fractures produisant de l'eau n'étaient plus isolées par les packers.

Certaines sections des sondages de la série LEB ont été échantillonnées en 1985 dans le but de préciser la composition chimique de l'eau souterraine saline en profondeur et de prélever des échantillons plus représentatifs des zones de forte conductivité hydraulique identifiées dans les sondages LEB-1, 2 et 4 pendant les essais de 1984. Aucun échantillonnage en profondeur n'a été fait dans LEB-2 en 1985, la conductivité hydraulique y étant très faible.

MÉTHODE

Les sondages de la série P ont été échantillonnés en 1984 avec des packers simples et des packers doubles raccordés à une colonne montante en PVC (voir section Essais à packers dans chapitre 4) dans laquelle une pompe pneumatique Bennett pouvait être descendue pour l'échantillonnage. En outre, à l'extérieur du tuyau l'espace annulaire était suffisant pour être échantillonné avec la même pompe. Les zones d'échantillonnage ont été choisies d'après la conductivité hydraulique et le degré de fracturation indiqués par les diagraphies acoustiques télévisées. Des essais à découvert sur toute la longueur des sondages P-6, P-7, P-11 et P-14 ont été faits parce qu'aucune zone de forte perméabilité n'a pu être relevée dans ces sondages. Une pompe électrique Keck a été utilisée pour échantillonner les sondages P-6 et P-7.

L'échantillonnage des sondages LEB-1, 2 et 4 en 1984 a été fait par pistonnage au câble d'acier dans une tige de forage AQ raccordée à chaque PIP, sauf le PIP à 650 m dans LEB-1 auquel on ne pouvait avoir accès ayant été recouvert par une chute de pierres. Les sections au-dessus du premier PIP dans les sondages LEB-2 et LEB-4 ont été échantillonnées avec une pompe péristaltique. Il faut souligner que le pistonnage dans une tige de forage n'est pas la meilleure méthode d'échantillonnage hydrogéochimique à cause des risques de contamination par le métal de la tige de forage elle-même et par les quantités généreuses de lubrifiant organique appliquées sur les filetages. Par exemple, une concentration de carbone organique dissous (COD) de 32 $mg \cdot L^{-1}$ a été mesurée dans l'eau de pistonnage de

la section 512 à 650 m de LEB-1. Toutefois, la caractérisation de la chimie des ions principaux ne devrait pas être très compromise par cette méthode. Un problème de contamination plus sérieux est lié à l'eau de forage utilisée pendant le forage des sondages LEB-1 à 4. Heureusement, l'eau de forage (recueillie à même les eaux superficielles locales) a été marquée à la Rhodamine WT, un colorant organique, de sorte qu'on a pu au moins évaluer qualitativement le degré de contamination en contrôlant la Rhodamine WT pendant le pistonnage au moyen d'un fluoromètre de Turner. La conductivité a été aussi contrôlée en même temps que la Rhodamine WT. Une fois la contamination réduite au maximum, une pompe péristaltique a été descendue jusqu'à une profondeur de 25 à 50 m dans la tige AQ pour recueillir le dernier ensemble d'échantillons d'eau souterraine destinés aux analyses chimiques et isotopiques.

En 1985, des échantillons ont été prélevés dans les tubages après l'ouverture de certains orifices de pompage. À chaque échantillonnage, l'eau a d'abord été prélevée dans le tubage par «air-lift» au moyen d'un compresseur. Une minuterie électrique a été utilisée pour commander le compresseur à raison d'environ une minute par heure, ce qui a permis de rétablir le niveau d'eau à une profondeur acceptable à l'intérieur du tubage avant chaque prélèvement. La conductivité et les concentrations de Rhodamine WT ont été contrôlées pendant les prélèvements par «air-lift». Une pompe péristaltique a été placée à environ 50 m pour recueillir le dernier ensemble d'échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques et isotopiques.

Les concentrations d'anions ont été mesurées régulièrement pendant les contrôles dans chaque sondage des séries P et LEB. L'alcalinité a été déterminée par titrage potentiométrique; les chlorures, par titrage par le nitrate de mercure; et les sulfates, par la méthode de titrage de Thorin. Il fallait aussi connaître les concentrations de bicarbonate et de sulfate afin d'ajouter pendant l'échantillonnage les quantités appropriées de réactifs pour précipiter le carbonate et le sulfate des échantillons en vue des analyses isotopiques. Les anions ont été mesurés dans le dernier ensemble d'échantillons dans le laboratoire sur le terrain, puisque l'alcalinité et les sulfates sont susceptibles d'être dégradés pendant l'entreposage. Le pH de l'eau souterraine, le potentiel rédox et l'oxygène dissous ont été contrôlés dans une cellule en continu pendant le pompage. Le fer à l'état ferreux a été dosé par colorimétrie (méthode au .2,2-bipyridyle) avec un spectrophotomètre.

Les échantillons pour le dosage des anions, des cations et des éléments à l'état de traces ont été filtrés sur le terrain à travers des membranes de cellulose de 0.45 μm. Les échantillons pour le dosage des cations et des éléments à l'état de traces ont été acidifiés avec 4 $mL \cdot L^{-1}$ de HCl et 8 $mL \cdot L^{-1}$ de HNO_3, respectivement. Les échantillons pour le dosage du carbone organique dissous ont été filtrés à travers des membranes d'argent de 0.45 μm insérées dans une seringue en verre, puis stockés dans des bouteilles de verre propres et pré-calcinées. Des échantillons de gaz dissous ont été prélevés dans des cylindres en acier inoxydable en vue d'être analysés par Énergie atomique du Canada à l'Établissement de recherche nucléaire de Whiteshell (ERNW). Des échantillons de gaz rare ont été recueillis dans des tubes en cuivre, sertis aux deux extrémités par des pinces et envoyés à l'Université McMaster (W.B. Clarke) pour être analysés. C'est à l'Université de Waterloo (P. Fritz) qu'on a dosé les isotopes ^{18}O, ^{2}H, ^{3}H, ^{13}C, ^{14}C, ^{34}S et ^{18}O-SO_4 dans les échantillons, et à l'Université McMaster (R.H. McNutt) qu'on a dosé les isotopes $^{87}Sr/^{86}Sr$. Le radon a été dosé sur le terrain, et des échantillons ont été recueillis pour le dosage du $^{234}U/^{238}U$ au ERNW (Bottomley et coll., 1986). Les résultats sur les isotopes du Sr ne sont pas disponibles en ce moment et ne sont pas analysés dans ce rapport.

Les dosages des cations, des anions et des éléments à l'état de traces ont été faits au laboratoire de River Road de l'INRH. Les méthodes analytiques du laboratoire de l'INRH sont décrites dans l'annexe C. Certains échantillons de l'ensemble final d'échantillons ont été prélevés en double dans certaines zones pour être analysés à l'ERNW.

RÉSULTATS

Représentativité des échantillons

Le tableau 13 est un résumé des dosages des ions principaux et secondaires les plus représentatifs pour chaque sondage de la série P et les zones isolées par PIP dans chacun des sondages échantillonnés en 1984. Des dosages des métaux à l'état de traces représentatifs pour la même année sont donnés dans le tableau 14. On estime que les résultats de l'échantillonnage de la série P représentent bien la variabilité spatiale réelle de la composition hydrogéochimique dans la couche supérieure de 50 à 100 m d'épaisseur du pluton. Des échantillons provenant de chaque zone des trous de carottage contenaient toutefois des quantités variables de Rhodamine WT, ce qui indique une contamination par les eaux de forage. La quantité de Rhodamine WT observée dans chaque zone était une fonction complexe de la concentration moyenne de Rhodamine WT dans l'eau de forage qui a été estimée par Raven et coll. (1984) comme variant entre 5 et 34 $\mu g \cdot L^{-1}$, selon la façon dont la Rhodamine WT a été injectée dans chaque sondage et les rapports de mélange d'eau de forage et d'eau souterraine. Donc, la représentativité des résultats pour les sondages de la série LEB est discutable.

Tableau 13. Sommaire des dosages les plus représentatifs pour 1984, des éléments principaux et secondaires de l'eau souterraine dans les sondages de la série P et de la série LEB du lac East Bull

Sondage	Profondeur (m)	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Sr^{2+}	Alk	SO_4^{2-}	Cl^{-}	F^{-}	Br^{-}	Si	B	pH	$S.I._c$	C.R. (%)
P-1	32-53.3	1.9	0.1	53	0.4	<0.06	139*	6.7†	0.6	<0.1	0.06	7.3	0.42†	9.1*	-0.17	0.2
P-2	24.5-38.1	1.7	0.2	55	0.4	<0.06	131*	9.0*	0.8	<0.1	0.05	8.6		9.6*	0.10	3.0
P-3	0-16	17.3	3.8	24	0.8	0.14	127*	8.6†	1.0	0.2	0.04	7.0	0.20†	7.3*	-0.98	1.0
P-3	16-38.1	1.1	0.2	58	0.5	<0.06	156*	7.5*	0.8	0.5	0.05	10.5	0.66†	9.3*	-0.20	2.9
P-4	0-35	25.0	4.7	8	1.6	<0.06	103*	3.6	0.9	<0.1	0.05	6.6		7.7*	-0.51	6.2
P-5	0-22	5.1	0.7	44	1.0	<0.06	123*	3.0†	1.0	0.3	0.03	6.8	0.61†	8.9*	0.02	3.2
P-5	88.5-97.6	1.6	0.3	59	0.3	<0.06	149*	6.0*	1.2	<0.1	0.03	9.1		9.4*	0.01	0.3
P-6	0-68	15.4	3.8	26	0.6	<0.06	120*	10.0*	0.6	0.3	0.04	4.0	0.30†	8.4*	0.05	0.4
P-7	0-39.6	22.8	1.1	3.9	0.9	0.12	68*	12.0	0.6	<0.1	0.04	5.2	<0.1†	9.0*	0.53	1.5
P-8	0-20	12.2	1.4	3.1	2.0	0.12	69*	6.2	0.9	<0.1	<0.02	4.8		6.5*	-2.17	17.0
P-9	0-12	15.8	2.2	4.4	0.6	<0.06	63*	5.7	0.5	<0.1	0.11	8.0		6.2*	-2.39	1.3
P-9	12-43.2	19.3	3.2	19	10.7	0.09	109*	29.6	1.2	<0.1	0.14	8.4		7.3*	-1.01	2.3
P-10	0-34.5	19.2	4.5	5.5	0.7	<0.06	82*	11.2*	2.8	<0.1	0.09	9.4		6.1*	-2.31	6.2
P-10	34.5-38.5	24.9	5.8	8.4	0.4	0.09	115*	12.5*	2.1	<0.1	0.12	9.0		6.6*	-1.57	2.5
P-10	66.3-70.3	20.7	5.5	10.6	0.7	<0.06	123*	12.0*	1.6	<0.1	0.11	8.0		7.8*	-0.42	8.1
P-10	82-98.7	19.2	4.2	17.8	1.0	0.09	112*	12.5*	1.1	<0.1	0.11	7.7		7.6*	-0.67	0.5
P-11	0-49.2	32.4	7.3	9.5	6.8	0.20	157	12.5	1.3	0.2	0.08	7.0	0.1†	6.8*	-1.15	1.3
P-12	0-37	5.9	1.6	45	13.2	0.11	110*	34.5*	0.7	0.2	0.05	4.0	0.9†	9.4*	0.44	3.3
P-12	38-48.6	4.1	0.9	40	6.8	0.12	116*	18.0*	0.9	0.4	0.13	6.8	1.5†	8.9*	-0.08	2.8
P-13	0-22	6.9	1.9	35	7.9	0.13	105*	17.0*	1.2	0.1	0.11	9.3		9.0*	0.18	2.6
P-14	0-43.3	23.1	5.5	2.6	1.6	0.15	93*	5.9	0.2	<0.1	0.10	6.7		7.5*	-0.78	3.2
LEB-1	147-298	2.4	0.4	84	0.5	<0.06	197	4.3	17.9	<0.1	0.10	12.5	1.0†	9.4	0.29	0.3
LEB-1	298-512	5.5	0.1	233	0.8	0.10	66*	17.8†	321*	<0.1	1.6	14.7	2.81†	10.2*	0.45	0.5
LEB-1	512-650	20.5	4.2	100	1.0	0.16	119	16.0†	81	<0.1	<0.02	5.2		7.7	-0.42	11.4
LEB-2	0-75	20.0	6.3	16	0.7	0.12	144*	29†	4.0	<0.1	0.17	5.4	0.12†	6.5*	-1.70	2.9
LEB-2	75-248	0.4	0.6	65	0.2	<0.06	157*	9.9*	10.9*	0.35	0.04	12.1	1.04†	10.4*	-0.13	3.4
LEB-2	248-460	0.5	0.3	74	0.5	<0.06	130*	21.5	31*	<0.1	0.3	14.4		9.7	-0.34	2.6
LEB-2	460-616	228	1.6	570	1.1	1.53	38*	11.4	1237	1.6	3.30	4.4		8.0	0.12	0.8
LEB-2	616-836	293	1.7	584	2.1	2.37	29*	20.0*	1350	2.0	2.05	1.5	0.20†	7.4	-0.47	1.5
LEB-3	0-443	25.7	6.0	16	0.4	0.19	125*	3.7	1.2	<0.1	0.05	4.6		7.5*	-0.62	7.1
LEB-4	0-120	13.3	4.8	15	0.9	<0.06	96*	9.0*	0.8	<0.1	0.05	7.7		6.7*	-1.79	1.4
LEB-4	120-198	1.6	0.6	78	0.4	<0.06	213*	1.6	1.7	0.4	0.03	15.8	2.16†	10.9*	0.44	1.2
LEB-4	198-396	3.6	0.9	72	0.4	<0.06	186	2.0	30.7	0.3	0.04	12.8		10.2	0.83	7.8
LEB-4	396-489	279	2.0	845	2.8	3.49	71*	77	1780	3.5	5.74	6.1		7.7	0.12	2.1

* Analyse sur le terrain - pH mesuré sur le terrain dans une cellule en continu.
† Analyse au laboratoire de l'ERNW.

$I.S._c$ = indice de saturation en calcite = $\log \frac{PAI}{K_T}$ où PAI = produit de l'activité ionique et K_T est la constante d'équilibre pour le réaction $CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + Co_3^{2-}$.

C.R. = Charge résiduelle.

Remarque : Les concentrations sont en milligrammes par litre; l'alcalinité en milligrammes par litre de bicarbonate.

Le temps de pistonnage qui a pu être consacré dans chaque zone a été limité par la conductivité hydraulique de la section et par le calendrier des travaux sur le terrain. Ceci a limité le temps qui a pu être consacré à éliminer la contamination par l'eau de forage. Par exemple, environ 1.5×10^5 L ont été prélevés (en 12 jours) de la zone supérieure (147 à 298 m) de LEB-1; la concentration de Rhodamine WT a alors été réduite de 76 à 40 $\mu g \cdot L^{-1}$, environ. Ceci correspond à une masse de Rhodamine WT d'environ 9 g. Bien qu'au total environ 37 g de Rhodamine WT aient été injectées pendant le forage, la plus grande partie du colorant a été dispersée en surface dans l'eau de forage ressortant du sondage. Donc, il est probable que la plus grande partie de la Rhodamine WT injectée dans les fractures du sondage se soit trouvée dans la zone supérieure. Cela ne signifie pas que la zone supérieure ait été la plus contaminée volumétriquement car la concentration de Rhodamine WT dans l'eau de forage utilisée pour le forage de la moitié inférieure du trou était d'un ordre de grandeur inférieure à celle au début de l'injection. Toutefois, bien que la contamination par l'eau de forage dans la zone supérieure de LEB-1 était clairement la plus manifeste, la plupart des autres zones des sondages LEB-2 et LEB-4 ont probablement été contaminées par un pourcentage d'eau de forage plus élevé.

Tableau 14. Sommaire des concentrations de métaux à l'état de traces obtenues en 1984 dans les eaux souterraines des sondages de la série P et de la série LEB

Sondage	Profondeur (m)	Fe	Mn	Ni	Zn	Cr
P-1	32-53.3	0.11	<0.04	<0.06	<0.02	<0.06
P-2	24.5-38.1	<0.04	<0.04	<0.06	<0.02	0.13
P-3	0-16	0.37	0.12	<0.06	0.40	0.12
P-3	16-38.1	<0.04	<0.04	<0.06	0.07	0.07
P-4	0-35	<0.04	<0.04	<0.06	0.15	0.18
P-5	0-22	0.06	<0.04	<0.06	0.27	0.25
P-5	88.5-97.6	<0.04	<0.04	<0.06	0.18	0.09
P-6	0-68	<0.04	<0.04	<0.06	<0.02	<0.06
P-7	0-39.6	<0.04	<0.04	<0.06	0.04	<0.06
P-8	0-20	0.18	0.05	0.11	1.66	<0.06
P-9	0-12	0.53	0.05	<0.05	0.03	<0.06
P-9	12-43.2	0.30	0.05	<0.06	0.94	<0.06
P-10	0-34.5	<0.04	0.06	0.11	0.79	0.30
P-10	34.5-38.5	0.15	0.08	0.11	0.51	<0.06
P-10	66.3-70.3	0.26	0.06	<0.06	0.39	0.10
P-10	82-98.7	<0.04	0.05	0.06	0.15	<0.06
P-11	0-49.2	0.23	0.25	<0.06	0.13	0.13
P-12	0-37	0.07	0.06	<0.06	0.10	0.15
P-12	38-48.6	0.08	0.05	<0.06	0.18	<0.06
P-13	0-22	<0.04	<0.04	<0.06	0.05	0.10
P-14	0-43.3	0.13	0.08	<0.06	0.12	<0.06
LEB-1	147-298	<0.04	<0.04	<0.06	<0.02	<0.06
LEB-1	298-512	0.14	<0.04	<0.06	<0.02	0.09
LEB-1	512-650	<0.04	0.13	<0.06	0.04	<0.06
LEB-2	0-75	18.7	0.82	<0.06	0.42	0.09
LEB-2	75-248	1.13	<0.04	0.13	<0.02	<0.06
LEB-2	248-460	0.30	<0.04	<0.06	0.08	0.09
LEB-2	460-616	0.12	0.13	0.15	0.39	<0.06
LEB-2	616-836	0.14	0.79	0.13	0.15	<0.06
LEB-3	0-443	<0.04	0.14	<0.06	0.10	0.16
LEB-4	0-120	3.2	0.22	<0.06	0.18	0.17
LEB-4	120-198	<0.04	<0.04	<0.06	<0.02	<0.06
LEB-4	198-396	<0.04	<0.04	0.07	0.06	<0.06
LEB-4	396-489	<0.04	<0.04	<0.06	0.04	0.19

Les analyses chimiques des eaux souterraines échantillonnées en 1985 sont présentées dans les tableaux 15 (éléments principaux et secondaires) et 16 (métaux à l'état de traces). La quantité d'eau prélevée par «air-lift» dans ces zones variait de 3700 L pour LEB-2 (111 à 126 m) à 26 000 L pour LEB-4 (429 à 456 m). Dans LEB-4 (429 à 456 m) en 1985, on a prélevé de l'eau plus salée qu'en 1984. La figure 30 montre la tendance de la conductivité électrique en fonction du volume d'eau souterraine soutirée. Deux paliers de conductivité ressortent de cet essai, et il est probable que des paliers plus élevés encore auraient été atteints si l'essai avait été poursuivi. La concentration de Rhodamine WT à la fin de l'essai était de 0.3 $\mu g \cdot L^{-1}$ contre 1.6 $\mu g \cdot L^{-1}$ pendant l'échantillonnage de la même zone en 1984.

La composition chimique de l'eau souterraine échantillonnée en 1985 dans la zone fracturée de forte conductivité

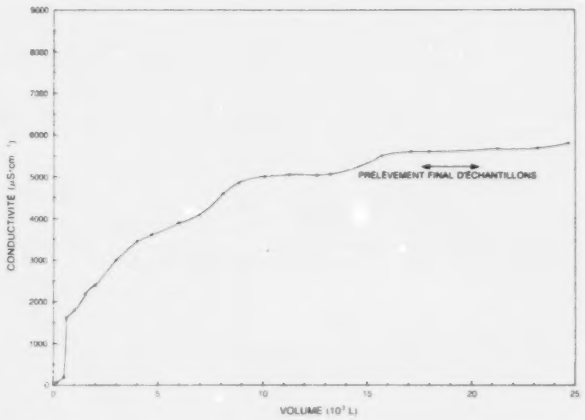

Figure 30. Courbe de la conductivité électrique en fonction du volume d'eau soutiré dans LEB-4 (429 à 456 m) en 1985.

Tableau 15. Dosages les plus représentatifs des éléments principaux et secondaires des échantillons d'eau souterraine prélevés dans certaines sections des sondages de la série LEB en 1985

Sondage	Profondeur (m)	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Sr^{2+}	Alk	SO_4^{2-}	Cl^{-}	F^{-}	Br^{-}	Si	pH	$I.S._c$	C.R. (%)
LEB-1	204-213	2.6	0.7	76	0.04	<0.06	190	3.5	17.8	<0.1	0.17	13.5	9.9*	0.57	2.4
LEB-1	504-650	8.5	0.3	205	0.10	0.09	69	14.5	310	0.6	1.66	19.3	9.8*	0.55	4.2
LEB-2	111-126	3.0	1.0	66	2.44	<0.06	172	3.4	6.8	<0.1	0.04	10.2	10.1*	0.70	1.7
LEB-4	105-117	1.3	2.9	60	0.75	<0.06	150	2.9	3.1	<0.1	<0.02	8.9	9.1	-0.31	6.0
LEB-4	429-456	455	2.2	1160	3.4	6.2	14	108	2580	0.6	10.8	9.2	8.5*	0.23	1.2

* Analyse sur le terrain- pH mesuré sur le terrain dans une cellule en continu.

$I.S._c$ = indice de saturation en calcite = $\log \frac{PAI}{K_T}$ où PAI = produit de l'activité ionique et K_T est la constante d'équilibre pour le réaction $CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + Co_3^{2-}$.

C.R. = Charge résiduelle.

Remarque : Les concentrations sont en milligrammes par litre; l'alcalinité en milligrammes par litre de bicarbonate.

Tableau 16. Concentrations représentatives des métaux à l'état de traces ($mg \cdot L^{-1}$) dans les eaux souterraines de certaines sections des sondages de la série LEB en 1985

Sondage	Profondeur (m)	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn	Cr	Pb
LEB-1	204-213	<0.02	0.56	<0.02	<0.06	0.02	0.09	0.12
LEB-1	504-650	<0.02	0.06	0.02	<0.06	<0.02	0.11	0.10
LEB-2	111-126	<0.02	0.58	<0.02	0.16	<0.02	0.12	<0.10
LEB-4	105-117	<0.02	0.10	<0.02	0.06	<0.02	<0.06	<0.10
LEB-4	429-456	0.02	0.13	<0.02	0.30	0.04	0.07	0.12

hydraulique, située à la base du troctolite dans LEB-1 (204 à 213 m), était semblable à celle mesurée en 1984. Environ 6300 L ont été soutirés en 1985, mais la concentration de Rhodamine WT pendant l'échantillonnage est restée élevée à 24 $\mu g \cdot L^{-1}$ tout en étant plus faible que la concentration finale de 41 $\mu g \cdot L^{-1}$ mesurée pendant le pistonnage de 1984.

La plus grande partie de l'eau échantillonnée dans LEB-1 (504 à 650 m) en 1985 provenait de la section avec tubage et packers de 504 à 537 m puisque les quatre orifices de pompage sous cette profondeur produisaient très peu d'eau. La composition de l'eau est semblable à celle retirée de la section 298 à 512 m pistonnée en 1984 (tableau 13). D'après les données sur les fractures, il est probable qu'une zone de fractures située entre 504 et 512 m (probablement à 510 m; voir section sur le sondage LEB-1 au chapitre 4) ait produit le plus d'eau pendant les deux essais en 1984 et 1985. Environ 7800 L d'eau ont été retirés de cette zone en 1985 et la concentration de Rhodamine WT était de 7 $\mu g \cdot L^{-1}$ contre 24 $\mu g \cdot L^{-1}$ dans les derniers échantillons prélevés de la section d'essai 298 à 512 m en 1984.

La fracture de forte conductivité hydraulique à la base du troctolite a été aussi échantillonnée en 1985 dans le sondage LEB-2 (111 à 126 m). Environ 3700 L d'eau souterraine ont été soutirés de cette zone, et la concentration finale de Rhodamine WT était de 0.6 $\mu g \cdot L^{-1}$. La composition chimique de cette eau est semblable à celle des échantillons d'eau souterraine prélevés dans le troctolite basal, dans le sondage LEB-1 (204 à 213 m).

L'autre zone échantillonnée en 1985 (LEB-4, 105 à 117 m) était la zone fracturée de forte conductivité hydraulique, associée à la sous-unité de pegmatite dans le gabbro lité. Cette zone produit probablement une quantité importante d'eau qui descend dans le sondage quand ce dernier est laissé à découvert (voir section sur le sondage LEB-4 au chapitre 4).

La composition en gaz dissous des eaux souterraines des sondages LEB est présentée dans le tableau 17, et les concentrations de He et de Ne et les rapports $^3He/^4He$, tels que déterminés par W.B. Clarke, sont présentés dans le tableau 18. La composition isotopique des eaux souterraines est donnée dans le tableau 19.

Échantillonnage de 1984

Éléments principaux et secondaires et métaux à l'état de traces

Les eaux souterraines dans les sondages de la série P sont généralement de type Na/HCO_3 ou Ca/HCO_3 avec de faibles concentrations de SDT (<200 $mg \cdot L^{-1}$) et de chlorures (0.2 à 2.8 $mg \cdot L^{-1}$). L'eau de type Ca/HCO_3 a nettement tendance à devenir de type Na/HCO_3 en profondeur, de même que latéralement dans la direction prévue d'écoulement des eaux souterraines (voir section sur les sondages de la série P au chapitre 6 et figure 31). Cette transition est accompagnée d'une forte augmentation du pH qui passe de 6.1 dans les zones de recharge présumée des eaux souterraines (P-8, P-10, P-11) à 9.6 dans les zones de décharge des eaux souterraines (c'est-à-dire les sondages jaillissants P-2 et P-3). Les eaux souterraines de type Ca/HCO_3 sont aussi sous-saturées par rapport au calcite dont les eaux riches en Na/HCO_2 sont saturées ou sursaturées. Les concentrations plus élevées de Mg^{2+} dans les eaux riches en Ca/HCO_3, les concentrations élevées de K^+ dans les sondages P-9, P-11, P-12 et P-13, et les concentrations élevées de SO_4^{2-} dans P-9, P12 et P-13 sont aussi d'autres caractéristiques notables. Par rapport aux teneurs en Sr^{2+} des terrains granitiques, celles des eaux souterraines des sondages de la série P sont très faibles.

L'eau souterraine au-dessus du premier PIP dans les sondages LEB-2 et LEB-4 était de type Ca/HCO_3 tout comme l'eau souterraine échantillonnée pendant le pompage à découvert de LEB-3. La zone au-dessus du premier PIP dans LEB-1 n'a pas été échantillonnée. Puisque la tige de forage est restée raccordée au premier PIP dans LEB-2 et LEB-4 pendant l'hiver, ces zones ont été contaminées par le fer (jusqu'à 22 $mg \cdot L^{-1}$ dans LEB-2). L'eau passe du type Ca/HCO_3 au type Na/HCO_3 puis au type Na/Cl en

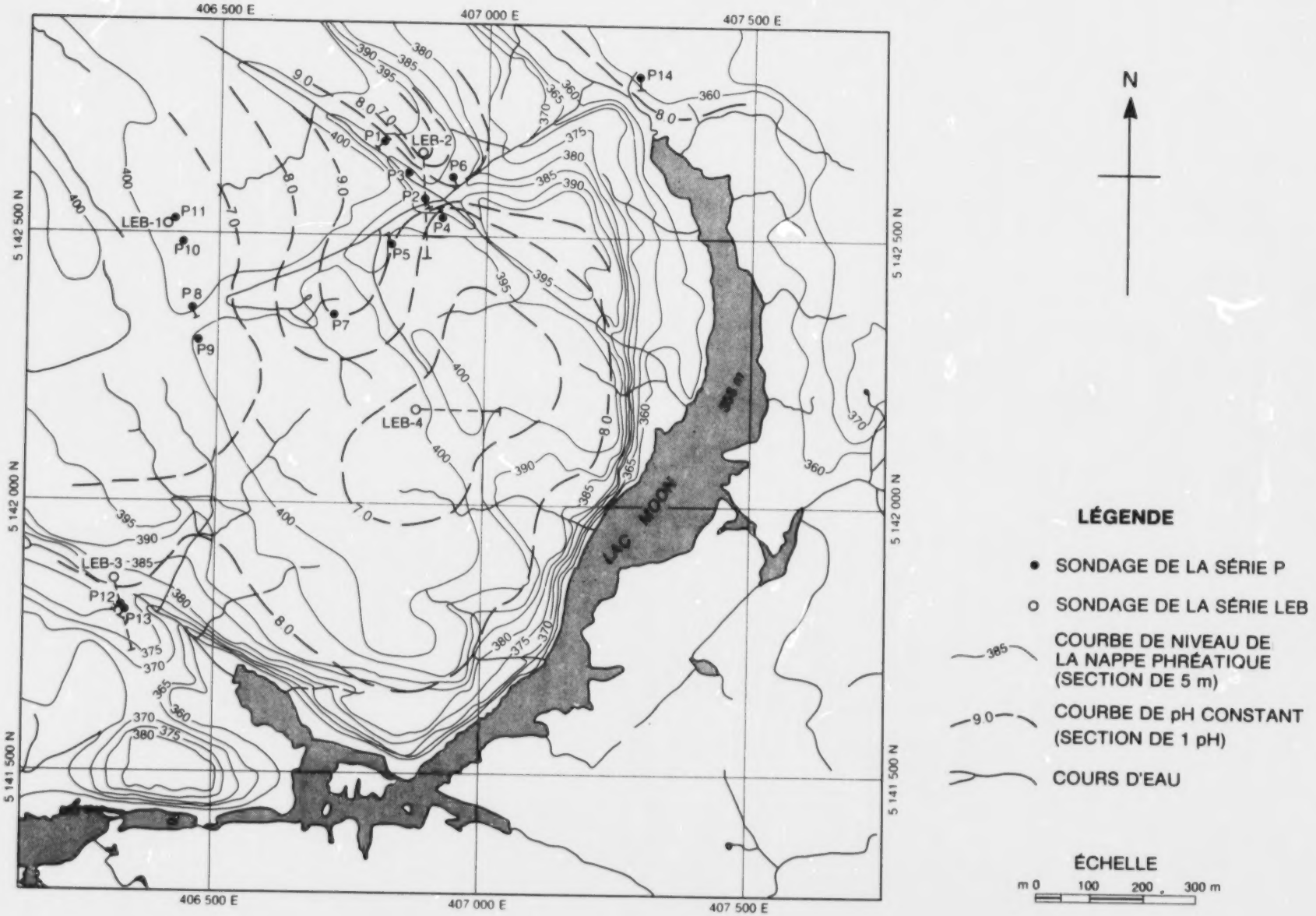

Figure 31. Carte de la nappe phréatique de la zone LEB basée sur les mesures du niveau de l'eau prises dans tous les sondages le 2 mai 1984 et la topographie de la région. Représentation aussi des courbes de pH constant pour toutes les eaux souterraines peu profondes (< 100 m), d'après les valeurs maximales mesurées dans chaque sondage en 1984.

Tableau 17. Composition en gaz dissous des eaux souterraines du lac East Bull

Sondage	Profondeur (m)	Gaz totaux ($cc \cdot kg^{-1}$)	He (vol. %)	N_2 (vol. %)	O_2 (vol. %)	Ar (vol. %)	CO_2 (vol. %)	H_2 (vol. %)	CH_4 (vol. %)
P-1	32-53.3	22.8	<0.01	92.30	5.06	1.83	0.79	–	–
P-3	0-16	35.6	<0.02	72.40	1.36	1.44	24.80	<0.02	–
P-3	16-38.1	25.8	<0.02	95.60	0.18	2.0	0.27	1.87	–
P-4	0-35	30.3	<0.01	84.90	0.61	1.75	12.70	–	–
P-5	0-22	25.2	<0.02	96.50	0.56	1.86	1.11	–	–
P-5	88.5-97.6	46.3	<0.02	94.10	3.39	1.76	0.74	–	–
P-6	0-68	20.1	<0.02	85.3	6.08	1.67	7.00	<0.02	–
P-8	0-20	9.0	<0.02	79.20	0.64	1.54	18.40	0.17	0.08
P-9	0-12	46.8	<0.05	58.40	0.64	1.17	39.80	<0.05	<0.05
P-10	34.5-38.5	77.9	<0.02	81.30	11.10	0.94	6.52	0.16	0.04
P-10	82-98.7	21.5	<0.02	90.00	2.98	1.36	5.68	<0.02	<0.02
P-11	0-49.2	32.9	<0.02	64.20	0.04	1.40	34.20	0.20	<0.02
P-12	38-48.6	21.6	<0.05	96.00	1.32	1.78	0.95	<0.05	<0.05
P-13	0-22	33.2	<0.02	94.70	1.87	1.75	1.59	0.07	<0.02
P-14	0-43.3	24.2	<0.05	83.90	0.71	1.88	13.50	<0.05	<0.05
LEB-1	147-298	24.5	<0.01	96.50	0.57	1.99	0.97	–	–
LEB-1*	204-213	31.8	0.46	91.10	0.32	6.51	0.65	0.41	0.61
LEB-1	298-512	27.8	1.39	94.70	1.94	1.57	0.34	–	–
LEB-1*	504-650	27.5	1.16	94.50	0.04	1.79	0.08	1.86	0.52
LEB-2	75-248	35.2	<0.05	96.00	1.09	2.39	0.51	<0.05	<0.05
LEB-2*	111-126	26.1	<0.02	96.10	1.50	1.88	0.18	0.07	0.28
LEB-3	0-443	24.0	<0.05	79.60	3.99	1.63	14.80	<0.05	<0.05
LEB-4	8-120	52.5	<0.01	61.80	3.23	1.42	33.50	–	–
LEB-4	120-198	27.6	<0.02	90.00	2.01	1.84	6.12	–	–
LEB-4*	429-456	41.3	6.72	89.50	0.12	1.59	0.67	0.04	1.37

* Analyse de 1985

Tableau 18. Concentrations d'hélium et de néon, et rapports $^3He/^4He$ dans les eaux souterraines des sondages LEB en 1984

Sondage	Profondeur (m)	He (meas.)	He (corr.)	Ne (meas.)	$^3He/^4He$ (corr.)
P-3	0-16	9.14×10^{-8}	6.26×10^{-8}	3.1×10^{-7}	2.58×10^{-6}
P-3	16-38.1	2.56×10^{-7}	2.24×10^{-7}	3.2×10^{-7}	3.72×10^{-7}
P-5	0-22	1.54×10^{-6}	1.45×10^{-6}	5.4×10^{-7}	9.44×10^{-8}
P-5	88.5-97.6	2.15×10^{-6}	2.02×10^{-6}	6.5×10^{-7}	0.81×10^{-7}
P-6	0-68	6.37×10^{-8}	4.93×10^{-8}	2.6×10^{-7}	1.94×10^{-6}
P-7	0-39.6	8.04×10^{-8}	5.74×10^{-8}	2.9×10^{-7}	1.29×10^{-6}
P-8	0-20	1.78×10^{-7}	1.66×10^{-7}	2.5×10^{-7}	6.19×10^{-7}
P-10	0-34.5	1.83×10^{-7}	1.66×10^{-7}	2.7×10^{-7}	1.15×10^{-6}
P-10	35.5-38.5	3.15×10^{-7}	2.89×10^{-7}	3.0×10^{-7}	6.58×10^{-7}
P-10	66.3-70.3	4.42×10^{-7}	4.07×10^{-7}	3.3×10^{-7}	3.43×10^{-7}
P-10	82-98.7	3.84×10^{-7}	3.49×10^{-7}	3.3×10^{-7}	2.49×10^{-7}
P-11	0-49.2	6.91×10^{-8}	5.47×10^{-8}	2.6×10^{-7}	1.59×10^{-6}
P-12	38-48.6	1.56×10^{-6}	1.52×10^{-6}	3.6×10^{-7}	9.60×10^{-8}
P-13	0-22	1.59×10^{-6}	1.56×10^{-6}	3.1×10^{-7}	8.56×10^{-8}
P-14	0-43.3	6.63×10^{-8}	4.90×10^{-8}	2.7×10^{-7}	3.04×10^{-6}
LEB-1	147-298	4.33×10^{-6}	4.26×10^{-6}	4.4×10^{-7}	3.47×10^{-8}
LEB-1	298-512	7.70×10^{-4}	7.62×10^{-4}	2.8×10^{-5}	5.34×10^{-9}
LEB-1	512-650	2.60×10^{-6}	2.60×10^{-6}	1.9×10^{-7}	4.17×10^{-8}
LEB-4	0-120	2.51×10^{-3}	2.51×10^{-3}	1.3×10^{-6}	1.73×10^{-6}
LEB-4	120-198	8.25×10^{-7}	7.62×10^{-7}	4.3×10^{-7}	2.41×10^{-8}

Remarque : Les mesures des concentrations de He et des rapports $^3He/^4He$ ont été corrigées ($He_{corr.}$) en supposant que les concentrations de Ne supérieures à la solubilité (2.1×10^{-7} cc TPN/g H_2O à 5 °C) sont dues à la contamination par le Ne contenu dans l'air. Toutes les concentrations sont en cc TPN/g H_2O.

Tableau 19. Composition isotopique des eaux souterraines du lac East Bull en 1984

Sondage	Profondeur (m)	^{18}O ‰ MNEO	^{2}H ‰ MNEO	^{3}H (UT)	^{34}S ‰ CD	^{18}O-SO_4 ‰ MNEO	^{13}C ‰ PDB	^{14}C (% MOD)
P-1	32-53	-11.8	-82.2	N.D.	+4.0	+3.5	-17.6	7.8
P-2	24.5-38	-11.9	-86	20	–	–	-14.5	30.0
P-3	0-16	-11.9	-85.1	44	+4.6	+6.5	-22.0	14.2
P-3	16-38	-12.0	-87.2	N.D.	+6.8	+7.5	-14.2	12
P-4	35-55	-11.5	-88	50	+3.5	+6.4		–
P-5	0-22	-15.8	-124	N.D.	+16.0	+8.7	-12.8	75
P-5	88.5-97.6	-17.8	-136	26	+21.2	+6.2	–	32.7
P-6	0-68	-11.7	-80.9	49	+3.7	+8.5	-17.1	25.3
P-7	0-39	-10.2	-73	59	+10.1	+6.1	–	–
P-8	0-20	-10.5	-76.9	77	+8.2	+5.7	-20.5	N.D.
P-9	0-12	-11.6	-80.7	53	+3.7	+5.2	-22.3	100
P-9	12-43	-11.6	-83.9	62	–	–	–	–
P-10	0-34.5	-11.5	-79.1	69	+6.3	+8.9	-23.9	132
P-10	34.5-38.5	-11.3	-78.5	53	+5.8	+7.0	-21.1	117
P-10	66.3-70.3	-11.2	-79.1	37	+1.6	+9.1	-20.5	79
P-10	82-98.7	-11.2	-79.8	22	+8.4	+7.1	-19.4	63
P-11	0-49.2	-11.2	-81.3	33	+11.2	+9.8	-25.1	–
P-12	0-37	-11.6	-80.2	18	+13.5	+10.8	-17.3	–
P-12	38-49	-12.0	-83.0	19	+11.6	+9.7	-17.2	52
P-13	0-22	-11.9	-84.2	N.D.	+4.0	+10.2	-16.1	69
P-14	0-43	-11.8	-82.6	92	+3.4	+3.4	-17.5	35.0
LEB-1	147-298	-13.8	-111	72			-15.2	38
LEB-1	298-512	-12.4	-95	13			-18.9	–
LEB-1	512-650	-11.4	-84	32	+30.3	+8.9		
LEB-2	0-75	-10.4	-74.6	53				
LEB-2	75-248	-14.1	-103.4	15				
LEB-2	248-460	-13.5	-103.2	34				
LEB-2	460-616	-8.7	-65.4	48				
LEB-2	616-836	-8.6	-67.0	62	+6.9	+6.8		
LEB-3	0-443	-11.4	-79.8	66			-18.9	39
LEB-4	0-120	-10.9	-76.7	25			-19.2	44
LEB-4	120-198	-15.0	-104.9	N.D.	+4.6	+8.7	-11.9	–
LEB-4	198-396	-14.1	-103.8	23				
LEB-4	396-489	-11.4	-78.0	24				

MNEO = Moyenne normalisée des eaux océaniques.
CD = Caynon Diablo troilite.
PDB = Pee Dee *Belemnitella americana*.
MOD = Moderne.
N.D. = Non décelé. .

Remarque : La précision des dosages du tritium est de ±10 UT.

fonction de la profondeur. L'eau la plus chargée en SDT (3100 $mg \cdot L^{-1}$) a été observée entre 396 et 489 m dans LEB-4, elle provient d'une grande zone de fractures à une profondeur d'environ 454 m. Dans LEB-1, 2 et 4, le pH des eaux souterraines est élevé (jusqu'à 10.4), ce qui a donné lieu à des concentrations relativement importantes de Si à cause de la dissociation de l'acide silicique ($pK_1 \simeq 9.8$). Ces eaux sont aussi saturées en calcite. Les eaux salines de type Na/Cl ont une alcalinité et un pH plus faibles, mais des concentrations de Br^-, F^- et Sr^{2+} bien plus élevées que les eaux de type Na/HCO_3.

Des concentrations représentatives de métaux à l'état de traces (Fe, Mn, Ni, Zn et Cr) dans les eaux souterraines de LEB sont présentées dans le tableau 14. Les concentrations de Cu, Pb et Al dans tous les échantillons étaient inférieures aux seuils de détection de 0.03, 0.10 et 0.40 $mg \cdot L^{-1}$, respectivement. Les fortes concentrations de fer mesurées dans les sondages LEB sont probablement dues à la contamination par les tiges de forage, particulièrement dans les échantillons des zones de LEB-2 situées entre 0 et 75 m et entre 75 et 248 m, et de la zone de LEB-4 située entre 0 et 120 m. L'observation la plus importante est la forte concentration de Cr dans certaines zones, concentration qui ne semble pas être liée à la contamination basée sur l'apparent manque de corrélation entre les concentrations de Cr et d'autres métaux. Le chrome est réputé relativement abondant dans les pyroxènes et l'olivine et

peut se trouver sous forme de chromite. Ces minéraux sont probablement à l'origine du Cr dans les eaux souterraines de la zone LEB. En Ontario, l'eau potable peut contenir selon les normes 50 $\mu g \cdot L^{-1}$ de Cr (sous forme de Cr^{6+}), niveau probablement dépassé dans au moins 16 des analyses présentées dans le tableau 14. Toutefois, seul le Cr total a été mesuré dans ces échantillons et non ses différentes espèces (Cr^{6+} ou Cr^{3+}).

Gaz dissous

L'azote est le principal gaz présent dans les eaux souterraines ce qui n'est pas surprenant compte tenu qu'il représente 78 % de la composition de l'atmosphère. Toutefois, la figure 32 montre que la teneur de ces eaux souterraines en N_2 est de beaucoup supérieure à la solubilité de l'azote atmosphérique dans l'eau en fonction de la température. La ligne «A» dans la figure 32 montre la relation de solubilité Ar-N_2 à diverses températures, dans de l'eau en équilibre avec l'atmosphère (EEA) à pression atmosphérique équivalente à 1. L'argon est généralement un gaz atmosphérique stable, et peut donc servir de repère pour comparer les autres concentrations de gaz dans les eaux souterraines. Les lignes «B» et «C» donnent les concentrations d'Ar-N_2 en fonction de la température, qui résulteraient d'additions respectives de 10 $mL \cdot kg^{-1}$ et de 20 $mL \cdot kg^{-1}$ H_2O, respectivement d'excès d'air dans de l'eau en équilibre avec l'air.

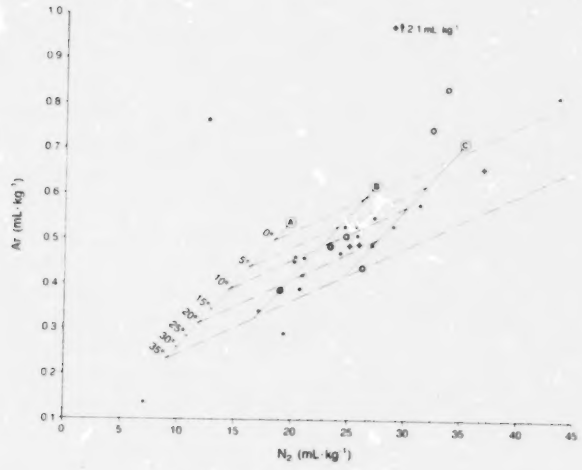

Figure 32. Concentrations de N_2 et d'Ar dans les eaux souterraines de la série LEB (cercles et croix) et de la série P (points). La ligne A représente la relation de solubilité Ar-N_2 à diverses températures pour de l'eau en équilibre avec l'atmosphère (EEA) à pression atmosphérique équivalente à 1. Les lignes B et C correspondent aux concentrations de Ar-N_2 qui résulteraient de l'addition de 10 et 20 $mL \cdot kg^{-1}$ H_2O, respectivement, d'air dans de l'EEA.

La ligne des eaux souterraines devrait être voisine de la ligne «A» s'il n'y a pas d'autre source de N_2 ou d'Ar. Toutefois, presque toutes ces eaux présentent de grands excès de N_2. La contamination par du N_2 s'échappant des packers ou des pompes utilisés pour l'échantillonnage pourrait expliquer l'excès de N_2 dans certains échantillons, mais nous n'avons relevé aucun indice de telles fuites pendant l'échantillonnage. De plus, les excès de N_2 dus à des fuites devraient être très variables, tandis que les excès de N_2 observés étaient systématiquement élevés. Il est peu probable que la dénitrification soit responsable des excès de N_2 puisque les concentrations de NO_3^- dans ces eaux souterraines sont généralement inférieures à 0.2 $mg \cdot L^{-1}$.

La cause la plus probable des excès de N_2 dans ces eaux est le piégeage de bulles d'air et leur dissolution graduelle par de l'eau s'infiltrant dans les zones non saturées (Heaton et Vogel, 1981; Vogel et coll., 1981). En effet, la plupart des échantillons LEB se situent près de la ligne reliant la marque de 10 °C de la ligne EEA et des quantités variables d'air en excès (atteignant environ 20 $mL \cdot kg^{-1}$ H_2O). Il est probablement raisonnable de situer la température moyenne annuelle de recharge des eaux souterraines de LEB (entre 5 °C et 10 °C) puisque la température annuelle moyenne est d'environ 3.8 °C (Leech et Cooper, 1982). On a relevé des excès d'Ar, probablement dus à l'altération des minéraux riches en K comme la biotite, dans les eaux souterraines de trois sondages de la série LEB. Toutefois la présence d'échantillons bien au-dessous de la ligne des 10 °C (déficience en Ar) est plus difficile à expliquer puisque les températures indiquées d'équilibre initial avec l'air sont trop élevées. Une étude des isotopes de l'azote gazeux aiderait à déceler les causes des excès de N_2 (Vogel et coll., 1981).

La solubilité de l'He atmosphérique à 5 °C est de 4.8×10^{-8} cm^3 TPN/g H_2O, et le rapport $^3He/^4He$, de 1.36×10^{-6}. L'injection d'air dans l'échantillon pendant l'échantillonnage ou les analyses augmente la concentration de He au-delà de la solubilité; il en va de même lorsqu'on introduit de l'air en excès pendant la recharge des eaux souterraines, comme cela a été mentionné auparavant. Pour déterminer la quantité de He radiogène présent dans l'échantillon (en fonction de la désintégration alpha des actinides contenus dans les roches), il faut soustraire la composante en air injecté de la concentration mesurée. La solubilité du néon atmosphérique est de 2.1×10^{-7} cm^3 TPN/g H_2O à 5 °C et ne varie pas beaucoup avec la température. Par conséquent, les concentrations mesurées de He peuvent être corrigées pour tenir compte de la contamination de l'air en supposant que les concentrations mesurées de néon supérieures à 2.1×10^{-7} cm^3 TPN/ g H_2O sont dues à une composante d'air; c'est ce qui a été fait dans le tableau 18.

Les concentrations corrigées de He varient entre 4.90×10^{-8} et 2.02×10^{-6} dans les eaux souterraines de la série P et entre 7.62×10^{-7} et 2.51×10^{-3} dans les eaux souterraines de la série LEB. Il y a donc d'importantes quantités de He radiogène dans la plupart des eaux souterraines de LEB mais elles sont généralement bien inférieures à celles du batholithe granitique du Lac du Bonnet où on note un enrichissement en uranium sur les minéraux de remplissage des fractures (Bottomley et coll., 1984). Au contraire l'eau souterraine et les roches du pluton de LEB ont une faible teneur en uranium (Bottomley et coll., 1986). Beaucoup d'échantillons d'eau souterraine de la série P ont de faibles concentrations de He et des rapports $^3He/^4He$ supérieurs à ceux de l'atmosphère à cause de la désintégration du tritium en ^3He.

Isotopes de l'environnement

La composition isotopique des eaux souterraines du lac East Bull est présentée dans le tableau 19. Les teneurs en ^{18}O et ^2H ainsi que la ligne d'eau atmosphérique globale ($\delta^2H = 8\,\delta^{18}O + 10$) de Craig (1961) sont indiquées dans la figure 33. La teneur en $\delta^{18}O$ des eaux souterraines de la série P se situe généralement entre -11.0 et -12.0 ‰, près de la ligne d'eau atmosphérique globale. Ces valeurs peuvent être considérées comme étant représentatives des eaux souterraines modernes qui se sont rechargées dans les conditions climatiques actuelles. Le sondage P-5 qui est le plus profond de la série P, a une composition isotopique inhabituelle car les eaux de la zone supérieure (0 à 22 m) et la zone du fond (88.5 à 97.6 m) renferment respectivement environ 4 ‰ et 6 ‰ moins $\delta^{18}O$ que les autres eaux souterraines de la série P. La composition chimique des eaux de P-5 n'est pas différente de celle des eaux souterraines de type Na/HCO_3 des autres sondages de la série P, ce qui indique que les conditions climatiques de recharge des eaux souterraines de P-5 étaient assez différentes de celles des autres eaux souterraines, mais que les processus d'évolution hydrogéochimique sont restés les mêmes. La composition isotopique annuelle moyenne actuelle des précipitations se reflète dans la composition isotopique des autres eaux souterraines de la série P. Le sondage P-5 présente aussi une teneur inhabituellement élevée en $\delta^{34}S$, ce qui reflète encore des sources ou processus (peut-être la réduction des sulfates) auxquels n'ont pas été exposées les autres eaux souterraines de la série P qui ont des teneurs en $\delta^{34}S$ et $\delta^{18}O\text{-}SO_4$ semblables aux teneurs en sulfate atmosphériques dans le bassin des Grands Lacs (Nriagu et Coker, 1978). Les teneurs positives en $\delta^{18}O\text{-}SO_4$ indiquent que l'oxydation des sulfures par les eaux atmosphériques n'a pas été une source importante de sulfate dissous dans les eaux souterraines de la série P.

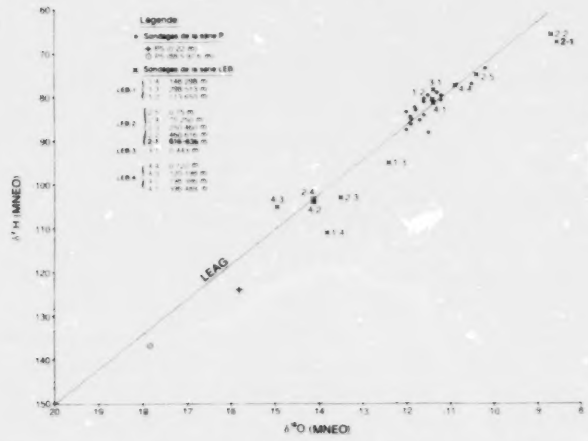

Figure 33. Courbe de la composition en isotopes stables (^{18}O-^2H) des eaux souterraines LEB, basée sur l'échantillon le plus représentatif prélevé dans chaque section d'essai. La ligne d'eau atmosphérique globale (LEAG) de Craig est aussi indiquée (1961). LEAG—Ligne d'eau atmosphérique globale.

Les eaux souterraines des sondages LEB 1 à 4 sont toutes plus riches en ^{18}O-^2H que celles de P-5, mais dans plusieurs zones elles sont moins riches que celles des autres sondages de la série P. Ces zones contiennent des eaux de type Na/HCO_3, tandis qu'on retrouve les eaux de type Na/Cl, dans la figure 33, près ou au-delà des eaux souterraines de la série P. Cela pourrait indiquer que ces eaux de type Na/Cl ont été très contaminées par des eaux de forage riches en isotopes qui ont des teneurs en $\delta^{18}O$ de -7 ‰ à -9.5 ‰ (Raven et coll., 1984).

Les données sur ^{18}O-^2H ont donc permis d'identifier des eaux de type Na/HCO_3 qui sont isotopiquement épuisées par rapport aux eaux souterraines actuelles peu profondes dans le pluton de la zone LEB. Ces eaux semblent avoir été rechargées dans des conditions climatiques considérablement plus froides, ou encore reflètent la présence d'une composante d'eau de fonte glaciaire au moment de la recharge comme l'indique la faible densité des eaux souterraines de P-5. La présence de tritium dans les sondages LEB confirme les résultats obtenus avec la Rhodamine WT qui indiquent que l'eau souterraine *in situ* a été contaminée par de l'eau de forage (18 à 74 U.T.). Il est donc possible que ces eaux soient en fait isotopiquement moins riches en ^{18}O-^2H que ne l'indique la figure 33.

La faible activité du ^{14}C dans les eaux de P-1, P-3 et P-8 est inhabituelle compte tenu de la faible teneur en $\delta^{13}C$ de ces eaux et de la teneur en $\delta^{13}C$ de la plupart des calcites des fractures du pluton qui est voisine de -3 ‰ (Bottomley, données non publiées). Par conséquent, bien que la dilution du ^{14}C par du carbone inactif puisse expli-

quer la faible activité du ^{14}C, la source de carbone-14 inactif semble peu riche en $\delta^{13}C$. Cela indique qu'il est possible que l'oxydation du méthane doive être considérée comme une source de carbonate dans l'eau peu profonde et qu'il y ait mélange d'eau souterraine plus vieible et plus profonde avec de l'eau plus jeune et peu profonde. Un modèle de datation au carbone-14 sera élaboré lorsque tous les dosages sont connus et des résultats seront analysés dans un prochain document.

Échantillonnage de 1985

L'échantillonnage de certaines sections en 1985 a confirmé la présence d'eau souterraine de type Na/HCO_3, de pH élevé, supersaturée en calcite, dans une zone de fracture de forte conductivité hydraulique à la base du troctolite dans les sondages LEB-1 et LEB-2 (tableau 15). Cette eau contient aussi des concentrations de Fe relativement élevées (tableau 16). L'azote est le principal gaz dissous dans la zone fracturée du troctolite, mais on trouve des quantités importantes de CH_4 et de H_2, ainsi que de He dans LEB-1. Il y a aussi de très fortes concentrations d'Ar dissous dans le troctolite de la zone LEB-1 (figure 32), ce qui indique la présence d'une source minérale d'Ar importante.

L'échantillonnage de 1985 confirme aussi la présence d'eau souterraine saline de type Na/Cl avec une concentration de SDT d'au moins 4.3 $g \cdot L^{-1}$ dans la zone fracturée à une profondeur d'environ 454 m dans LEB-4. Les salinités auraient probablement été même supérieures à cette profondeur si on avait pu continuer le pompage. De fortes concentrations de He et de CH_4 ont été mesurées dans cette eau souterraine, tandis que la concentration d'Ar semble être d'origine atmosphérique (figure 32).

L'eau échantillonnée dans le fond de LEB-1 (504 à 650 m) en 1985 n'était pas plus chlorée que celle échantillonnée en 1984 à 298 à 512 m. En fait, les eaux sont chimiquement très semblables. Toutefois, les fortes concentrations de Rhodamine WT encore présentes dans cette eau indiquent que la contamination par l'eau de forage est encore importante. Il est aussi probable que cette zone renferme une quantité d'eau souterraine d'origine peu profonde qui serait descendue dans le sondage pendant que ce dernier a été laissé à découvert. Il faut donc conclure que la salinité *in situ* en profondeur, au voisinage de LEB-1, est inconnue. Toutefois, la composition en gaz dissous à cette profondeur indique la présence de conditions de forte réduction puisque les concentrations de H_2 et de CH_4 sont élevées par rapport à celles de O_2. Cela indique que les eaux relativement peu profondes (déjà contaminées par l'eau de forage) polluent davantage l'eau de forage injectée directement qui, on peut le supposer, était bien oxygénée. Si c'est le cas, et si la concentration de Rhodamine WT (24 $\mu g \cdot L^{-1}$) mesurée dans LEB-1 (204 à 213 m) est représentative de la composante d'eau peu profonde, on peut donc estimer que l'eau souterraine *in situ* ne contiendra que 30 % environ d'eau souterraine d'origine peu profonde. Ainsi, la teneur en chlore *in situ* dans la zone fracturée à 504 à 512 m serait inférieure à 500 $mg \cdot L^{-1}$.

L'eau souterraine de LEB-4 (105 à 117 m), de type Na/HCO_3, a une alcalinité relativement élevée par rapport à celle de l'eau saline de type Na/Cl en profondeur. Malheureusement, l'alcalinité n'obéit pas au principe de la conservation et ne peut être utilisée pour estimer le degré de mélange de l'eau souterraine peu profonde avec l'eau saline puisque le mélange des deux eaux ferait précipiter du carbonate. De plus, les concentrations de Rhodamine WT mesurées pendant l'échantillonnage de la couche supérieure de 200 m d'épaisseur de LEB-4 en 1984 étaient aussi faibles que celles de l'eau souterraine saline en 1985. Donc, pour LEB-4, la Rhodamine WT n'est pas un paramètre fiable pour estimer le degré de dilution de l'eau souterraine profonde par l'eau souterraine peu profonde avant l'isolation du sondage. La réduction observée dans l'eau souterraine saline, telle qu'indiquée par la forte concentration de O_2 par rapport au CH_4 et la forte concentration de He, indique que l'eau souterraine peu profonde est probablement une source de contamination plus importante que l'eau de forage injectée directement.

Le dosage des isotopes des échantillons recueillis en 1985 n'est pas terminé et sera analysé en détail dans un prochain document. Toutefois, de très faibles teneurs en $\delta^{18}O$, qu'on avait observées uniquement dans les eaux de P-5 ont aussi été relevées (-16.4 ‰) dans l'eau de la zone de troctolite de LEB-2, entre 111 et 126 m, ce qui indique la présence possible de cette eau pauvre en isotopes dans la zone du troctolite de la partie nord-ouest du pluton. La teneur en $\delta^{18}O$ de l'eau saline recueillie dans la zone fracturée de LEB-4 à 450 m en 1985 était de -11.9 ‰, ce qui confirme les mesures de 1984 indiquant que l'eau saline a une composition isotopique semblable à celle des eaux souterraines de la série P et des précipitations modernes.

ANALYSE

L'eau souterraine du lac East Bull est caractérisée par une zonation hydrogéochimique distincte, tant horizontalement que verticalement, comme l'indique le graphique trilinéaire de la composition en ions principaux (figure 34). La zone proche de l'intersection des alignements structuraux 050 et 130 est une zone de décharge d'eau souterraine, les charges hydrauliques dans les sondages P-2 et P-3 étant au-dessus du sol. La faille du lac Folson à l'extrémité sud

de la zone étudiée apparaît aussi comme étant une limite du réseau d'écoulement des eaux souterraines peu profondes représenté sur la carte de la nappe phréatique (figure 31). Les mesures de charge hydraulique dans LEB-3 indiquent que les eaux descendent le long de la faille jusqu'à une profondeur de 250 m. Les eaux souterraines de type Na/HCO_3 dans les sondages de la série P sont confirmées dans ces zones de décharge. La zone de décharge est caractérisée par des eaux de type Ca/HCO_3. Le passage de l'eau souterraine du type Ca/HCO_3 au type Na/HCO_3 dans les sondages de la série P est clairement indiquée dans le diagramme trilinéaire de la figure 34. Cette transition se fait aussi en fonction de la profondeur comme l'indiquent les analyses des eaux souterraines des sondages de la série LEB qui sont caractérisées par de forts gradients hydrauliques vers le bas. Le même phénomène a été observé dans d'autres régions granitiques; dans la zone LEB, il est probablement le résultat d'échanges d'ions entre les minéraux des fractures secondaires puisque la diminution de Ca^{2+} et de Mg^{2+} (en milliéquivalents) est presque compensée par l'augmentation de Na^+. L'altération des silicates ne semble pas en être la cause puisque les concentrations de Si ne présentent aucune tendance nette dans cette transformation. De plus, on pourrait s'attendre à ce que l'altération en l'absence d'échange d'ions régularise la concentration de Ca. Cependant il y a de fortes augmentations de Si dans les eaux souterraines à pH élevé des sondages de la série LEB et elle sont probablement dues à la dissociation de l'acide salicilique ce qui favoriserait la dissolution des silicates.

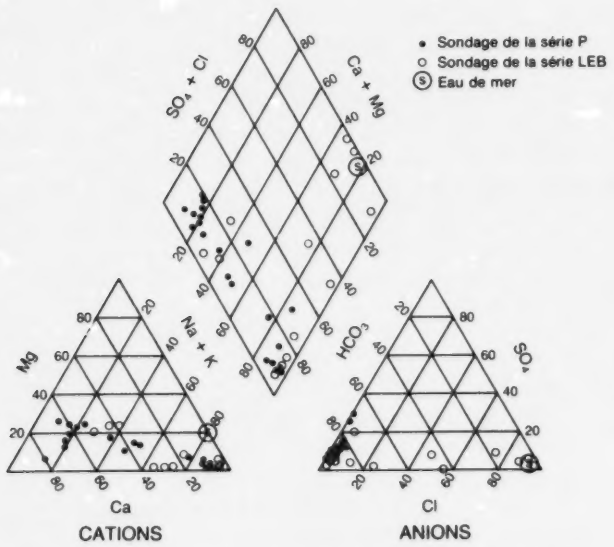

Figure 34. Courbe trilinéaire de la composition en ions principaux (% des milliéquivalents totaux) des eaux souterraines de LEB.

Malgré l'abondance de Mg dans les gabbros de LEB, les concentrations de Mg dans les eaux souterraines sont faibles, sauf dans certaines eaux souterraines de type Ca/HCO_3, ce qui est étonnant puisque le Mg dans l'olivine de la troctolite devrait par exemple être libéré plus rapidement que le Ca des plagioclases calciques (Siegel et Pfannkuch, 1984). Les pyroxènes devraient aussi libérer rapidement du Mg. L'unité de troctolite a été échantillonnée en 1984 dans LEB-1, 2 et 4, dans les sections respectives de 148 à 298 m, 75 à 250 m et 120 à 198 m, et dans LEB-1 et LEB-2 en 1985. Dans tous les cas, les concentrations de Mg^{2+} n'ont pas dépassé 1 $mg \cdot L^{-1}$. Puisque l'on sait que le troctolite est serpentinisé (Ejeckam et coll., 1984), il est possible que la formation de serpentine, de talc, et de chlorite, ou des trois, régularise les concentrations de Mg^{2+}.

La serpentinisation des roches ultramafiques peut se produire à basses températures (< 100 °C) et, dans ce cas, les minéraux dont la serpentine est habituellement composée sont la lizardite ou la chrysotile (Moody, 1976). Barnes et O'Neil (1969) et Barnes et coll. (1972) ont montré que la serpentinisation peut se produire aux températures près de la surface dans l'ouest des États-Unis où des eaux de type Ca/OH, à pH élevé, contenant de très faibles concentrations de Mg^{2+} (<1 $mg \cdot L^{-1}$), sont associées au processus de serpentinisation. Par ailleurs, on a trouvé que l'altération de la serpentine produit des eaux de type Mg/HCO_3.

L'étude thermodynamique de la chimie de l'eau souterraine dans le troctolite, dans les sondages LEB-1, 2, et 4, indiquent une sursaturation en chrysotile $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ et une sous-saturation en olivine à forstérite (Mg_2SiO_4) et en pyroxène à clinoenstatite ($MgSiO_3$). Il est donc possible que la serpentinisation récente par laquelle du Mg^{2+} se libère de l'olivine et de la pyroxène obéisse au principe de la conservation. Le fait que les eaux souterraines du troctolite de LEB soient de type Na/HCO_3 plulôt que du type Ca/OH s'expliquerait par les échanges $Ca^{2+} - Na^+$ susmentionnés dans de l'eau contenant encore des concentrations relativement élevées de carbonate alcalin. Bien que les eaux souterraines du troctolite soient saturées en calcite, les mesures isotopiques touchant la calcite dans les fractures du troctolite n'ont pas révélé la présence de calcite qui aurait pu précipiter dans les eaux souterraines actuelles (Bottomley, données non publiées).

Le fer libéré de l'olivine semble être en grande partie conservé sous forme d'oxydes de fer bien que les concentrations de fer soient relativement élevées dans les eaux souterraines du troctolite échantillonné en 1985 (tableau 16). En conditions de pH élevé et de E_H faible, le fer pourrait former du $Fe(OH)_2$ ou du Fe_3O_4 (magnétite), ce dernier

minéral ayant été observé dans le troctolite serpentinisé par Ejeckam et coll. (1984). L'oxydation du $Fe(OH)_2$ en Fe_3O_4 libère du H_2 gazeux, ce qui a déjà été observé dans des eaux souterraines de type Ca/OH, dans des roches ultramafiques serpentinisées, par Barnes et coll. (1972) et Neal et Stanger (1983). De l'hydrogène gazeux a été aussi observé dans une partie des eaux souterraines de LEB bien que le H_2 puisse aussi provenir du méthane. La possibilité que la serpentinisation se produise actuellement dans le pluton de LEB donne à penser et appelle des recherches supplémentaires. Le dosage de l'oxygène 18 dans la serpentine et la magnétite indiquerait si ce processus a lieu dans les eaux souterraines actuelles.

Les eaux de type Na/Cl se trouvent dans l'unité d'anorthosite sous le gabbro. L'anorthosite est légèrement altérée en laumontite ($CaAl_2Si_2O_{12} \cdot 4H_2O$) le long des surfaces des fractures. Puisque l'anorthosite est essentiellement une roche composée de plagioclase calcique, il est peu probable que l'interaction roche-eau puisse être responsable de la composition en Na/Cl de ces eaux à moins que la plupart du Ca libéré soit fixé dans des minéraux secondaires de type laumontite. Il est aussi possible, cependant, que la composition en Na/Cl de ces eaux soit une caractéristique primaire qui reflète la chimie des ions principaux de l'eau qui a pénétré le socle précambrien soit sous forme d'eau de mer d'infiltration, soit sous forme d'eau de formation d'âge inconnu. Le brome et le chlore sont deux éléments qui obéissent assez bien au principe de la conservation et le rapport molaire de ces éléments a fréquemment été utilisé pour identifier l'origine des eaux salines. Les eaux de type Na/Cl de LEB présentent un rapport Br/Cl de 1 à 2 $\times 10^{-3}$ qui est semblable à ceux de l'eau de mer (3.4×10^{-3}). Ce rapport est considérablement plus petit que celui des eaux souterraines salines et des saumures (6×10^{-3} à 1.25×10^{-2}) du Bouclier canadien qui seraient les produits d'interactions prolongées roches/eaux (Frape et Coll., 1984), mais il est semblable à celui de certaines eaux de formation d'après Nordstrom (1983). Le mélange entre l'eau souterraine qui a évolué en type Na/HCO_3 et une composante d'eau marine modifiée en type Na/Cl pourrait expliquer la chimie des eaux souterraines profondes des sondages de la série LEB (Figure 34).

Les eaux de type Na/Cl ont des concentrations élevées de calcium mais des concentrations de Mg^{2+} et K^+ plus basses que celles de beaucoup d'eaux souterraines de la série P. Toutefois, les concentrations de Sr^{2+} dans les eaux de type Na/Cl sont beaucoup de fois plus élevées que celles dans les eaux de types Ca/HCO_3 et Na/HCO_3. Le rapport élevé Ca/Mg de l'eau de type Ca/Cl suppose une élimination très efficace du Mg^{2+} si une composante en eau de mer est responsable de la salinité. Par ailleurs, si la salinité est le résultat d'interactions intensives roche-eau, les faibles concentrations de Mg^{2+} ne posent aucun problème car la roche en profondeur est essentiellement de l'anorthosite qui est surtout composée de plagioclase calcique dont le rapport Ca/Mg est élevé. Il est possible que les résultats des dosages isotopiques du Sr indiquent que le Sr comme la salinité proviendraient des eaux de type Na/Cl (McNutt et coll., en préparation).

L'eau de type Na/Cl semble plus riche en isotopes ^{18}O-^{2}H que les eaux souterraines de la série P bien que la contamination par de l'eau de forage riche en isotopes (Raven et coll., 1984) semble obscurcir en partie la zone réelle occupée par les eaux de type Na/Cl dans le diagramme ^{18}O-^{2}H (figure 33). Les eaux de type Na/Cl ont des compositions en isotopes qui les classent près des eaux de la série P sur la ligne d'eau atmosphérique, mais il faudrait procéder à un échantillonnage plus détaillé pour déterminer s'il s'agit de la limite isotopique vraie pour les eaux de type Na/Cl ou s'il s'agit d'échantillons mélangés contenant une composante Na,Ca/Cl enrichie de ^{2}H comme c'est le cas dans les saumures des mines du Bouclier canadien (Frape et coll., 1984).

Synthèse et résumé

Les recherches hydrogéologiques effectuées dans la zone de recherches du lac East Bull ont porté essentiellement sur des mesures fiables de la conductivité hydraulique, de la charge hydraulique et de la composition chimique de l'eau souterraine d'un pluton de gabbro-anorthosite jusqu'à des profondeurs de 800 m. Ces mesures sont fondamentales pour mettre au point un modèle d'écoulement de l'eau souterraine dans la zone de recherches et finalement pour évaluer le principe de l'entreposage et de l'évacuation en profondeur des déchets radioactifs dans des roches plutoniques. Dans cette section du rapport, les résultats des recherches hydrogéologiques effectuées dans la zone de recherche du lac East Bull sont résumés, évalués en termes de fiabilité et interprétés dans le contexte d'un système régional d'écoulement des eaux souterraines.

La conductivité hydraulique du gabbro-anorthosite a été mesurée directement au moyen d'une variété de méthodes d'essais d'hydraulique dans des sondages simples et déduites des résultats de levés et d'essais faits dans d'autres sondages, tels que des diagraphies des fractures, des levés débitmétriques, des contrôles de charge hydraulique et des échantillonnages d'eau souterraine. Des essais d'hydraulique répétés, dans des sondages tant peu profonds que profonds, indiquent de façon fiable que la conductivité hydraulique de la masse rocheuse diminue avec la profondeur, d'une valeur moyenne près de la surface de 10^{-8} $m \cdot s^{-1}$ à moins de 10^{-12} $m \cdot s^{-1}$ en-dessous de 400 à 500 m de profondeur.

En plus de cette tendance générale de la conductivité hydraulique en fonction de la profondeur, on note l'effet important de plusieurs zones de fractures perméables sur le comportement des systèmes régionaux d'écoulement des eaux souterraines, tant profonds que peu profonds, dans la zone de recherches. Les discontinuités structurales 050 et 130 jouent un rôle hydrogéologique important; il s'agit de vastes zones de fractures associées à la base de l'horizon de troctolite et des fractures associés à un dyke porphyritique près du contact basal du pluton mafique et de la faille du lac Folson. Des essais d'hydraulique au moyen de différents types de packers montrent que ces structures ont une conductivité hydraulique bien plus importante que celle de la masse rocheuse environnante.

Les zones de fractures 050 et 130 sont subverticales et ont été associées à deux alignements structuraux principaux identifiés sur les photographies aériennes de la moitié nord de la zone de recherches. Les zones de fractures se manifestent en surface sous forme de deux dépressions topographiques linéaires dont les eaux de drainage en surface sont canalisées vers le nord-est et vers le sud-est, en direction du lac Moon. Les zones de fractures ont des conductivités hydrauliques moyennes de $0.6 - 1.0 \times 10^{-7}$ $m \cdot s^{-1}$ qui sont de 10 à 50 fois environ plus élevées que la conductivité hydraulique moyenne de la masse rocheuse environnante. La conductivité hydraulique élevée des zones de fractures ainsi que les mesures de la charge hydraulique indiquent que les zones de fractures canalisent rapidement l'eau souterraine. Les charges hydrauliques observées montrent en outre que ces structures agissent à la fois comme sources et comme drains pour les eaux souterraines de la masse rocheuse environnante et qu'il existe probablement des régimes d'écoulement verticaux complexes dans les zones de fractures. Les composantes de l'écoulement horizontal dans chaque alignement structural ont, en supposant qu'il y a continuité hydraulique, des directions semblables à celles du drainage en surface.

La fracturation associée à la base de l'unité de troctolite inclinée présente une transmissivité hydraulique élevée et uniforme de $1 \text{ à } 3 \times 10^{-7}$ $m^2 \cdot s^{-1}$ dans trois sondages, à des profondeurs de 123 à 210 m. Les mesures de transmissivité et de la charge hydraulique indiquent que l'eau souterraine s'écoule probablement de la roche mère sus-jacente, longe la base du troctolite vers le nord-est et émerge là où l'unité affleure dans la dépression topographique, entre l'extrémité nord du lac Moon et le lac Little Bull.

La fracturation observée le long du contact d'un dyke porphyritique dans le sondage LEB-4, près du contact basal du pluton mafique du lac East Bull, a une transmissivité élevée reproductible ($2 \text{ à } 3 \times 10^{-7}$ $m^2 \cdot s^{-1}$) et une faible charge hydraulique (352 m au-dessus du niveau de la mer). Cette charge hydraulique est la valeur d'équilibre la plus basse enregistrée dans tous les sondages du lac East Bull et elle est inférieure à l'altitude du lac Moon adjacent, soit 355 m au-dessus du niveau de la mer. Le point de décharge le plus probable de cette zone de fracture de faible

charge hydraulique se trouve le long de la faille du lac Folson au voisinage du lac Parisien (altitude de 339 m au-dessus du niveau de la mer) situé à 2.5 km au sud-est du sondage LEB-4. Ces relations de la hauteur piézométrique indiquent que la zone de fractures fait partie d'un grand système d'écoulement régional qui inclut la zone de fractures étendue de la faille du lac Folson.

La faille du lac Folson est une faille régionale qui traverse l'extrémité sud de la zone de recherches du lac East Bull. Les quelques données hydrogéologiques disponibles indiquent que la faille est caractérisée par une conductivité hydraulique variable mais généralement plus élevée et par une charge hydraulique faible. Il semble probable que l'eau souterraine s'écoule localement de la zone de recherches vers la faille et longe cette dernière vers le sud-est en direction du lac Parisien.

Les directions des eaux souterraines dans les principales zones de fractures et dans la masse rocheuse principale sont basées sur des mesures fiables de la charge hydraulique et de la conductivité hydraulique et supposent une continuité structurale et hydraulique entre les points d'observation. Il est difficile, voire impossible, d'évaluer directement que l'hydraulique entre les points d'observation est continue, à partir des essais d'hydraulique du lac East Bull, à cause des vastes échelles spatiales et de la conductivité hydraulique généralement faible de la roche mère. À défaut de résultats des essais d'hydraulique, les directions de l'écoulement souterrain peuvent être évaluées indirectement à partir des caractéristiques isotopiques et chimiques de l'eau souterraine.

Les mesures de charge hydraulique obtenues de divers façons (sondages à découvert, à deux éléments, PIP et tubages à plusieurs packers) sont généralement reproductibles jusqu'à des profondeurs de 400 à 500 m et indiquent que le système régional d'écoulement des eaux souterraines est relativement simple dans la zone de recherches du lac East Bull. L'écoulement de l'eau souterraine dans les 200 m supérieurs reflète la topographie locale avec de forts gradients de recharge et un écoulement horizontal dirigé vers le nord-est, vers les dépressions topographiques créées par les zones de fractures 050 et 130, et vers le sud, vers la faille du lac Folson. Cet écoulement général est perturbé par les zones de fractures 050 et 130 et les fractures à la base de l'unité de troctolite. Entre 200 et 400 à 500 m, les mesures de charge hydraulique sont moins nombreuses et moins fiables, mais indiquent des gradients verticaux semblables dans les sondages LEB-1 et LEB-2, et des gradients verticaux plus importants dans les sondages LEB-3 et LEB-4. Les composantes horizontales de l'écoulement entre ces profondeurs sont dirigées vers le sud et le sud-est. On pense que les gradients verticaux plus importants observés dans les parties sud et sud-est de la zone de recherches et que le présumé écoulement horizontal vers le sud-est, expliqueraient le drainage de la masse rocheuse vers la faille du lac Folson probablement le long des fractures près du contact basal du pluton. Sous 500 m de profondeur, les rares mesures de charge hydraulique proviennent de deux sondages (LEB-1 et LEB-2), et la fiabilité de ces mesures est discutable. Les données disponibles indiquent que l'eau souterraine s'écoule vers le haut à partir des profondeurs de 700 à 800 m, puis horizontalement vers la faille du lac Folson. Ces directions présumées de l'écoulement devraient être évaluées avec des mesures plus fiables et plus nombreuses de la charge hydraulique et de la densité des fluides.

La composition chimique de l'eau souterraine dans la couche supérieure de 250 m d'épaisseur du pluton LEB est contrôlée par des interactions roche-eau dans les fractures, et non par la composition de la masse rocheuse. Selon la direction de l'écoulement, vers le nord-est en direction de l'intersection des alignements 050 et 130, et vers le sud en direction de la faille du lac Folson, la composition chimique de l'eau souterraine change, passant du type Ca/HCO_3, au type Na/HCO_3 essentiellement à cause des réactions d'échange d'ions. Les eaux de type Ca/HCO_3 et les eaux peu profondes de type Na/HCO_3 dans les sondages de la série P (à l'exception du sondage P-5) ont des compositions en ^{18}O et ^{2}H d'origine atmosphérique qui sont semblables à celles des précipitations annuelles moyennes actuelles. Les eaux peu profondes de type Na/HCO_3 trouvées dans P-5 et dans les sondages de la série LEB ont des teneurs en isotopes moins élevées. Les teneurs très faibles observées dans P-5 et LEB-2 (111 à 126 m) indiquent la présence possible d'une composante d'eau de fonte glaciaire dans ces eaux. Le confinement de telles eaux dans ces zones indique que les récents systèmes d'eaux souterraines postglaciaires dans cette zone n'ont pas encore éliminé (vers le nord-est) les derniers vestiges de recharge en eau de fonte glaciaire provenant de la grande zone de fractures à la base du troctolite.

L'eau riche en Na/Cl trouvée en profondeur dans le pluton semble être soit de l'eau de mer modifiée, soit une composante d'eau de formation ancienne qui s'est infiltrée dans les roches cristallines du socle. L'âge de cette composante saline est inconnu, mais sa présence dans la zone de fractures de conductivité hydraulique élevée et de faible charge hydraulique, à 454 m dans LEB-4, ainsi que le grand volume d'eau soutiré dans cette zone en 1985 indiquent qu'elle fait partie d'un système d'écoulement régional actif. On peut, à partir de la concentration élevée de He dans l'eau saline de LEB-4 (tableau 17), estimer le temps de séjour de l'eau, moyennant certaines hypothèses et restrictions dont ont traité Bottomley et coll. (1984).

Si l'on suppose une porosité totale de la roche de 1 % et des concentrations de U et de Th dans la roche de 1 à 3 µg/g, respectivement, on calcule que le temps de séjour est d'environ 50 millions d'années. Pour savoir si cet âge est raisonnable, il suffit de voir à quel point les hypothèses sur lesquelles repose la technique de datation de l'hélium concordent. Il ne fait aucun doute que les concentrations présumées de U et de Th dans les roches de gabbro-anorthosite ne sont pas trop faibles et il n'y a aucun signe d'enrichissement à la surface des fractures (Kamineni, EACL, communication personnelle). Toutefois, on ne peut écarter actuellement la fuite de He à partir des roches granitiques sous-jacentes ou des roches métasédimentaires précambriennes environnantes, riches en uranium.

Références

Aitchison, J., et J.A.C. Brown. 1957. The lognormal distribution. Cambridge University Press, Monograph 5, Cambridge, pp. 30-33.

Barnes, I., et J.R. O'Neil. 1969. The relationship between fluids in some fresh alpine type ultramafics, and possible modern serpentinization, western United States. Geol. Surv. Am. Bull. 80: 1947-1960.

Barnes, I., J.B. Rapp, J.R. O'Neil, R.A. Sheppard, et A.J. Gude. 1972. Metamorphic assemblages and the direction of flow of metamorphic fluids in four instances of serpentinization. Contrib. Mineral. Petrol. 35: 263-276.

Born, P. 1978. Geology of the East Bull Lake layered complex, District of Algoma, Ontario. Thèse de M. Sc, inédite, Université Laurentienne, Sudbury (Ontario).

Born, P., et R.S. James. 1978. Geology of the East Bull Lake layered gabbro-anorthosite intrusion, District of Algoma, Ontario. Dans Current Research, Part A, Com. Géol. du Can. Étude. 78-1A, pp. 91-95.

Bottomley, D.J., J.D. Ross, et W.B. Clarke. 1984. Helium and neon isotope geochemistry of some ground waters from the Canadian Precambrian Shield. Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 1973-1985.

Bottomley, D.J., M. Gascoyne, J.D. Ross, et J.T. Ruttan. 1986. Hydrogeochemistry of the East Bull Lake pluton, Massey, Ontario. EACL, rapport technique* TR-32.

Brown, A., et D.C. Kamineni. 1981. Preliminary report on the fracture sets of East Bull Lake pluton, western Ontario. Geological Activities Internal Report. Inédit. Rapport disponible auprès de la Commission géologique du Canada, 601 rue Booth, Ottawa (Ontario) K1A 0E8.

Cooper, H.H., Jr., et C.E. Jacob. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Trans. Am. Geophys. Union, 27: 526-534.

Cooper, H.H., Jr., J.D. Bredehoeft, et I.S. Papadopulos. 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. Water Resour. Res., 3(1): 263-269.

Craig, H. 1981. Isotope variations in meteoric waters. Science, 133: 1702-1703.

Ejeckam, R.B., R.I. Sikorsky, et D.C. Kamineni. 1984. Preliminary report of subsurface geology of the East Bull Lake Research Area (RA-7) in northeastern Ontario. Rapport inédit RW-GLG-062-84, disponible auprès de la Direction des sciences de la terre, 1 Observatory Cres., Ottawa, K1A 0Y3

Ermanovics, I., R.A. Gibb, S.H. Whitaker, et K.G. Raven. 1983. Advances in the geoscience surveys at the East Bull Lake Research Area (RA-7) near Massey, Ontario. Dans Proc. 16th Information Meeting of the Nuclear Fuel Waste Management Program. EACL, rapport technique* TR-218, pp. 51-73.

Ermanovics, I., N.M. Soonawala, R.A. Gibb, et R. Pearson. 1982. Preliminary results of geoscience surveys at the East Bull Lake Research area (RA-7) near Massey, Ontario. Dans Proc. 14th Information Meeting of the Nuclear Fuel Waste Management Program (1982 General Meeting), EACL, rapport technique* TR-207, pp. 143-161.

Frape, S.K., P. Fritz, et R.H. McNutt. 1984. Water-rock interactions and chemistry of ground waters from the Canadian Shield. Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 1617-1627.

Gringarten, A.C., et H.J. Ramey, Jr. 1974. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry. Soc. Petrol. Eng. J., 14(4): 413-422.

Heaton, T.H.E., et J.C. Vogel. 1981. Excess air in groundwater. J. Hydrol., 50: 201-216.

Hvorslev, M.J. 1951. Time lag and soil permeability in groundwater observations. Bull. 36, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps. Eng., Vicksburg, Mississippi, 49 p.

James, R.S., et P. Born. 1985. Geology and geochemistry of the East Bull Lake intrusion, District of Algoma, Ontario. Can. J. Earth Sci., 22(7): 968-979.

Johnson, C.R., R.A. Greenkorn, et E.G. Woods. 1966. Pulse-testing: A new method for describing reservoir flow properties between wells. J. Pet. Technol., 18: 1599-1604.

Jorgensen, D.G., T. Gogel, et D.C. Signor. 1982. Determination of flow in aquifers containing variable-density water. Groundwater Monitoring Rev. 2(2): 40-45.

* On peut se procurer les rapports techniques de l'Énergie Atomique du Canada, Limitée, qui sont publics mais non publiés, auprès du Bureau de distribution des documents scientifiques de la Société de recherche de l'Énergie Atomique du Canada, Limitée, Chalk River (Ontario) K0J 1J0.

Kamineni, D.C., G.F. McCrank, D. Stone, R.B. Ejeckam, R. Flindall, et R. Sikorsky. 1984. Geology of the central plateau of the East Bull Lake pluton, northwestern Ontario. Dans Current Research, Part B, Com. géol. du Com. Étude 84-1B, pp. 75-83.

Lee, D.R. 1983. Groundwater discharge zones. Dans Proc. 15th Information Meeting of the Nuclear Fuel Waste Management Program, EACL, rapport technique° TR-216, pp. 74-79.

Leech, R.E.J., et A.J. Cooper. 1982. Preliminary terrain assessment of three potential research areas in northern Ontario, EACL, rapport technique°TR-196.

Louis, C., et Y.N. Maini. 1970. Determination of the in situ hydraulic parameters in jointed rock. Proc. 2nd Congress of Int. Soc. of Rock Mechanics, Belgrade, Étude 1-32, pp. 235-245.

Lusczynski, N.J. 1961. Head and flow of groundwater of variable density, J. Geophys. Res., 66(12):4147-4256.

McCrank, G.F.D., D.Stone, D.C.Kamineni, B. Zayachkivsky, et G. Vincent. 1983. Regional geology of the East Bull Lake area, Ontario. Dans Current Research, Part A Com. géol. du Can. Étude 83-1A, pp. 457-464.

McCrank, G.F.D., D. Stone, R. Ejeckam, D.C. Kamineni, R.I. Sikorsky, et J. McEwen. 1984. Surface and subsurface geological investigations of the East Bull Lake pluton. Dans Proc. 17th Information Meeting of the Nuclear Fuel Waste Management, EACL. Sous presse.

McNutt, R.H., S.K. Frape, et P. Fritz. 1984. Strontium isotopic composition of some Precambrian Shield brines. Isotope Geosci. 46: 205-215.

Moody, J.B. 1976. Serpentinization: A review. Lithos, 9: 125-138.

Moore, E.S., and W.S. Armstrong. 1943. Geology of the East Bull Lake area, Algoma District, Ontario. Ministère des Mines de l'Ontario Rep. 52, Part 6, pp. 1-19.

Neal, C., et G. Stanger. 1983. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. Earth Planet. Sci. Lett., 66: 315-320.

Nordstrom, K. 1983. Conceptual framework for the chemical processes in the Stripa ground waters. KBS progress report, 83-01, Stockholm, Sweden, pp. 106-115.

Novakowski, K.S., et P.A. Flavelle. 1985. Performance evaluation of multiple-packer casing installations at the Chalk River Nuclear Laboratories and the East Bull Lake study areas. Inédit. Institut national de recherche en hydrologie, rapport disponible auprès de: Environnement Canada, 11 Innovation Blvd., Saskatoon (Sask.), S7K 3H8.

Nriagu, J.O., et R.D. Coker. 1978. Isotopic composition of sulphur in precipitation within the Great Lakes Basin. Tellus, 30: 365-375.

Paillet, F.L., et A.E. Hess. 1986. Geophysical well-log analysis of fractured crystal line rocks at East Bull Lake, Ontario, Canada. United States Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 86-4052.

Raven, K.G. 1986. Hydraulic characterization of a small groundwater flow system in fractured monzonitic gneiss. Institut national de recherche en hydrologie, Environnement Canada, Rapport INRH nº 30, Étude, nº 149, Série scientifique de la DGEI.

Raven, K.G., J.A. Smedley, R.A. Sweezey, et K.S. Novakowski. 1984. Borehole hydrogeologic investigations at the East Bull Lake research area: Summary of 1983 activities. Inédit. Rap. de l'INRH, 91 p.

Redford, S.W. 1983a. A detailed gravity survey of the East Bull Lake intrusion, Research Area RA-7, Algoma District, Ontario. Inédit. Rapport à contrat, Paterson, Grant and Watson Ltd., Toronto, 9 p.

Redford, S.W. 1983b. A detailed ground VLF survey of the East Bull Lake intrusion, Research Area RA-7, Algoma District, Ontario. Inédit. Rapport à contrat, Paterson, Grant and Watson Ltd., Toronto, 7 p.

Siegel, D.I., et H.O. Pfannkuch. 1984. Silicate dissolution influence on Filson Creek chemistry, northeastern Minnesota. Geol. Soc. Am. Bull. 95: 1446-1453.

Vogel, J.C., A.S. Talma, et T.H.E. Heaton. 1981. Gaseous nitrogen as evidence for denitrification in groundwater. J. Hydrol. 50: 191-200.

Watson, R.K. 1982. A gravity survey of the East Bull Lake intrusion, Research Area RA-7, Algoma District, Ontario. Inedit. Rapport à contrat, Paterson, Grant and Watson Ltd., Toronto.

Annexe A

Résumé des résultats des essais au packer double, sondages P-1 à P-14

Tableau A-1. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-1

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0101	8.00–12.10	3.51	391.8	4×10^{-7}	1×10^{-7}
P0102	12.00–16.00	2.67	392.6	2×10^{-7}	5×10^{-8}
P0103	13.00–17.00	3.35	392.0	9×10^{-8}	2×10^{-8}
P0104	16.00–20.00	2.48	392.8	5×10^{-7}	1×10^{-7}
P0105	20.00–24.00	3.30	392.0	2×10^{-7}	5×10^{-8}
P0106	24.00–28.00	2.92	392.4	2×10^{-7}	5×10^{-8}
P0107	28.00–32.10	3.14	392.2	6×10^{-8}	1×10^{-8}
P0108	32.00–36.10	2.90	392.4	3×10^{-7}	8×10^{-8}
P0109	36.00–40.10†				
P0111	40.00–44.10†				
P0112	44.00–48.10†				
P0113	48.00–52.10†				
P0114	49.20–53.30†	3.19	392.1	1×10^{-8}	2×10^{-9}
P0115	45.00–53.30†				
P0116	46.00–53.30	3.33	392.0	2×10^{-8}	3×10^{-9}
P0117	22.00–53.30	3.51	391.8	1×10^{-6}	3×10^{-8}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-2. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-2

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0201	9.00–12.05	−0.72	392.0	1×10^{-6}	2×10^{-7}
P0202	13.00–17.05	−0.02	391.3	1×10^{-7}	3×10^{-8}
P0203	17.00–21.05	−0.20	391.5	2×10^{-7}	6×10^{-8}
P0204	21.00–25.05	−0.36	391.6	1×10^{-8}	2×10^{-9}
P0205	25.00–29.05	−0.03	391.3	9×10^{-8}	2×10^{-8}
P0206	29.00–33.05†				
P0207	33.00–37.05	−0.01	391.3	8×10^{-7}	2×10^{-7}
P0208	37.00–38.10	1.32	396.0	1×10^{-8}	2×10^{-9}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-3. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-3

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0301	4.00–8.05†				
P0302	8.00–12.05†				
P0303	12.00–16.05	0.16	390.6	3×10^{-7}	7×10^{-8}
P0304	16.00–20.05	−0.03	390.8	3×10^{-7}	8×10^{-8}
P0305	20.00–24.05†				
P0306	24.00–28.05†				
P0307	28.00–32.05†				
P0308	32.00–36.05	0.08	390.7	4×10^{-7}	1×10^{-7}
P0309	32.00–38.10	−0.17	390.9	3×10^{-8}	6×10^{-9}
P0310	16.00–38.10	−0.38	391.2	3×10^{-7}	1×10^{-8}
P0311	0.00–6.00	1.08	389.7		

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-4. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-4

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0401	8.00-12.05	3.90	389.6	2×10^{-6}	4×10^{-7}
P0402	12.00-16.05	2.43	390.9	2×10^{-8}	5×10^{-8}
P0403	16.00-20.05	2.78	390.6	2×10^{-8}	5×10^{-9}
P0404	20.00-24.05	2.62	390.8	3×10^{-8}	1×10^{-9}
P0405	24.00-28.05	2.86	390.5	2×10^{-8}	5×10^{-9}
P0406	28.00-32.05†				
P0407	32.00-36.05†				
P0408	36.00-40.05†				
P0409	40.00-44.05	2.96	390.4	2×10^{-7}	4×10^{-8}
P0410	44.00-48.05†				
P0411	48.00-52.05†				
P0412	41.00-55.00†				
P0413	35.50-55.00†				
P0414	20.50-55.00†				
P0415	14.70-55.00	2.69	390.7	5×10^{-7}	1×10^{-8}
P0416	0.00-7.70†				

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-5. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-5

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0501	9.00-13.05†				
P0502	13.00-17.05†				
P0503	17.00-21.05†				
P0504	15.00-19.05†				
P0505	17.00-21.05†				
P0506	21.00-25.05	1.35	395.1	9×10^{-8}	2×10^{-8}
P0507	25.00-29.05†				
P0508	29.00-33.05†				
P0509	33.00-37.05	1.17	395.3	2×10^{-7}	6×10^{-8}
P0510	37.00-41.05	1.15	395.3	2×10^{-7}	5×10^{-8}
P0511	41.00-45.05†				
P0512	45.00-49.05	1.23	395.2	1×10^{-6}	3×10^{-7}
P0513	49.00-53.05	1.25	395.2	1×10^{-6}	3×10^{-7}
P0514	53.00-57.05†				
P0515	57.00-61.05	1.09	395.4	1×10^{-6}	3×10^{-7}
P0516	61.00-65.05†				
P0517	65.00-69.05	1.19	395.3	4×10^{-7}	1×10^{-7}
P0518	69.00-73.05	1.24	395.2	2×10^{-7}	4×10^{-8}
P0519	73.00-77.05	1.23	395.2		
P0520	77.00-81.05	0.74	395.7	6×10^{-7}	1×10^{-7}
P0521	81.00-85.05	0.77	395.7	2×10^{-7}	5×10^{-8}
P0522	84.30-88.35	1.05	395.4	2×10^{-7}	5×10^{-8}
P0523	88.30-92.35	1.15	395.3	3×10^{-7}	7×10^{-8}
P0524	92.30-96.35	1.24	395.2	2×10^{-7}	4×10^{-8}
P0525	33.00-97.60	1.24	395.2	4×10^{-6}	6×10^{-8}
P0526	49.00-97.60	1.24	395.2	1×10^{-6}	3×10^{-8}
P0527	77.00-97.60	0.72	395.7	6×10^{-7}	3×10^{-8}
P0528	85.00-97.60	1.04	395.4	5×10^{-8}	4×10^{-9}
P0529	88.50-97.60	0.90	395.5	2×10^{-7}	2×10^{-8}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-6. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-6

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0601	17.00-21.05	9.70	390.1	4×10^{-8}	1×10^{-8}
P0602	21.00-25.05	10.17	389.6	9×10^{-8}	2×10^{-8}
P0603	25.00-29.05	11.16	388.7	7×10^{-8}	2×10^{-8}
P0604	29.00-33.05	11.28	388.6	2×10^{-8}	7×10^{-9}
P0605	33.00-37.05	12.37	387.5	1×10^{-9}	3×10^{-10}
P0606	37.00-41.05	28.04	372.1	8×10^{-9}	2×10^{-9}
P0607	41.00-45.05	21.24	378.7	7×10^{-8}	3×10^{-8}
P0608	45.00-49.05	20.33	379.6†		
P0609	49.00-53.05	20.40	379.6	9×10^{-8}	2×10^{-8}
P0610	53.00-57.05	28.20	371.9	2×10^{-8}	5×10^{-9}
P0611	57.00-61.05	21.25	378.6	9×10^{-8}	2×10^{-8}
P0612	61.00-65.05	18.51	381.4	8×10^{-10}	2×10^{-10}
P0613	65.00-68.00	21.06	378.9	5×10^{-9}	1×10^{-9}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-7. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-7

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0701	4.00-8.09†				
P0702	8.00-12.09†				
P0703	11.00-15.09	0.75	402.4	1×10^{-9}	2×10^{-10}
P0704	15.00-19.09†				
P0705	19.00-23.09†				
P0706	23.00-27.09	1.13	402.1	1×10^{-9}	2×10^{-10}
P0707	27.00-31.09	1.53	401.6	5×10^{-10}	1×10^{-10}
P0708	31.00-35.09	1.29	401.9	1×10^{-9}	2×10^{-10}
P0709	35.00-39.09	1.32	401.9	5×10^{-10}	1×10^{-10}
P0710	39.00-39.95	1.29	401.9	1×10^{-9}	1×10^{-9}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-8. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-8

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0801	4.00-8.05	1.87	399.3	2×10^{-6}	5×10^{-7}
P0802	8.00-12.05	1.95	399.2	1×10^{-9}	4×10^{-10}
P0803	12.00-16.05	1.95	399.2	1×10^{-9}	4×10^{-10}
P0805	16.00-20.05	2.26	398.9	4×10^{-6}	1×10^{-6}
P0806	20.00-24.05	2.53	398.7	5×10^{-10}	1×10^{-10}
P0807	24.00-28.05	2.46	398.7	1×10^{-9}	4×10^{-10}
P0808	28.00-32.05	2.58	398.6	3×10^{-9}	8×10^{-10}
P0809	32.00-36.05	2.52	398.7	2×10^{-9}	5×10^{-10}
P0810	36.00-40.05†				
P0811	32.00-45.20	2.65	398.5	1×10^{-9}	4×10^{-10}
P0812	16.00-45.20	1.65	399.5	4×10^{-6}	1×10^{-7}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-9. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-9

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P0901	5.00–9.05	1.10	400.4	5×10^{-6}	1×10^{-6}
P0902	9.00–13.05	1.29	400.2	2×10^{-7}	5×10^{-8}
P0903	13.00–17.05	1.29	400.2	2×10^{-9}	5×10^{-10}
P0904	17.00–21.05	1.29	400.2	1×10^{-9}	4×10^{-10}
P0905	21.00–25.05	1.29	400.2	3×10^{-10}	1×10^{-10}
P0906	25.00–29.05	1.29	400.3	3×10^{-10}	1×10^{-10}
P0907	29.00–33.05	1.40	400.1	9×10^{-10}	2×10^{-10}
P0908	33.00–37.05	1.48	400.0	1×10^{-8}	4×10^{-9}
P0909	37.00–41.05	1.27	400.2	3×10^{-9}	7×10^{-10}
P0910	41.00–43.20	1.58	399.9	1×10^{-9}	4×10^{-10}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.

Tableau A-10. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-10

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P1001	9.00–13.05	4.45	401.0	7×10^{-8}	2×10^{-8}
P1002	13.00–17.05	5.94	399.5	3×10^{-7}	7×10^{-8}
P1003	17.00–21.05	5.04	400.4	4×10^{-7}	1×10^{-7}
P1004	21.00–25.05†				
P1005	25.00–29.05	6.14	399.3	4×10^{-8}	9×10^{-9}
P1006	29.00–33.05	5.32	400.1	2×10^{-8}	5×10^{-9}
P1007	33.00–37.09	6.53	398.8	8×10^{-7}	2×10^{-7}
P1008	37.00–41.05†				
P1009	41.00–45.05	6.00	399.4	1×10^{-8}	4×10^{-9}
P1010	45.00–49.05	5.30	400.1	5×10^{-9}	1×10^{-9}
P1011	49.00–53.05	5.77	399.7	3×10^{-8}	7×10^{-9}
P1012	53.00–57.05	5.92	399.5	6×10^{-8}	2×10^{-8}
P1013	57.00–61.05	5.92	399.5	5×10^{-9}	1×10^{-9}
P1014	61.00–65.05	6.00	399.4	2×10^{-8}	5×10^{-9}
P1015	65.00–69.05	6.00	399.4	8×10^{-7}	2×10^{-7}
P1016	69.00–73.05	6.00	399.4	3×10^{-8}	7×10^{-9}
P1017	73.00–77.05	6.00	399.4	3×10^{-8}	7×10^{-9}
P1018	77.00–81.05	6.00	399.4	2×10^{-8}	5×10^{-9}
P1019	81.00–85.05	6.05	399.4	1×10^{-7}	3×10^{-8}
P1020	85.00–89.05	4.66	400.8	8×10^{-10}	2×10^{-10}
P1021	89.00–93.05	5.78	399.6	2×10^{-7}	4×10^{-8}
P1022	93.00–97.05	5.78	399.6	1×10^{-7}	4×10^{-8}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-11. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-11

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P1101	8.00–12.10	2.81	402.8	4×10^{-9}	1×10^{-9}
P1102	12.00–16.10	2.81	402.7	5×10^{-8}	1×10^{-8}
P1103	16.00–20.10	2.80	402.8	3×10^{-8}	7×10^{-9}
P1104	20.00–24.10	2.88	402.7	3×10^{-9}	9×10^{-10}
P1105	24.00–28.10†				
P1106	28.00–32.10	3.32	402.2	1×10^{-8}	4×10^{-9}
P1107	32.00–36.10	3.29	402.2	1×10^{-8}	4×10^{-9}
P1108	36.00–40.10	3.42	402.1	1×10^{-8}	4×10^{-9}
P1109	40.00–44.10†				
P1110	44.00–49.20	3.40	402.2	1×10^{-8}	4×10^{-9}
P1111	36.00–49.20†				
P1112	5.00–49.20	3.70	401.9	2×10^{-6}	4×10^{-7}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-12. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-12

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P1201	4.00–48.60	2.31	376.1	1×10^{-6}	2×10^{-8}
P1202	8.00–48.60	2.49	375.9	9×10^{-7}	2×10^{-8}
P1203	12.00–48.60	2.76	375.7	9×10^{-7}	2×10^{-8}
P1204	16.00–48.60†				
P1205	20.00–48.60†				
P1206	24.00–48.60†				
P1207	28.00–48.60†				
P1208	32.00–48.60†				
P1209	36.00–48.60	3.39	375.1	4×10^{-7}	4×10^{-8}
P1210	40.00–48.60†				
P1211	44.00–48.60†				
P1212	38.00–48.60	3.83	374.7	3×10^{-8}	2×10^{-9}
P1213	12.00–48.60	2.76	375.7	1×10^{-6}	3×10^{-8}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-13. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-13

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P1301	5.00–9.05	2.93	375.8	1×10^{-7}	3×10^{-8}
P1302	9.00–13.05	3.07	375.7	4×10^{-7}	1×10^{-7}
P1303	13.00–17.05†				
P1304	17.00–21.05†				
P1305	21.00–25.05†				
P1306	25.00–29.05†				
P1307	29.00–33.05†				
P1308	33.00–37.05†				
P1309	37.00–41.05†				
P1310	41.00–45.05†				
P1311	44.00–48.05†				
P1312	9.00–48.70	3.61	375.2	2×10^{-6}	5×10^{-8}
P1313	20.00–48.70†				
P1314	31.00–48.70	3.53	375.3	5×10^{-8}	3×10^{-9}
P1315	40.00–48.70	3.51	375.3	5×10^{-8}	6×10^{-9}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Tableau A-14. Sommaire des résultats des essais à packers, sondage P-14

Essai	Profondeur (m)*	Niveau hydrostatique (m)*	Charge hydraulique (m)**	T ($m^2 \cdot s^{-1}$)	K_{erm} ($m \cdot s^{-1}$)
P1401	8.00–12.10	2.28	360.8	2×10^{-7}	6×10^{-8}
P1402	12.00–16.10†				
P1403	16.00–20.10	2.30	360.8	5×10^{-9}	1×10^{-9}
P1404	20.00–24.10	2.84	360.2	9×10^{-8}	2×10^{-8}
P1405	24.00–28.10	2.00	361.0	3×10^{-9}	8×10^{-10}
P1406	28.00–32.10†				
P1407	32.00–36.10	2.25	360.8	1×10^{-9}	3×10^{-10}
P1408	36.00–40.10	2.27	360.8	1×10^{-9}	3×10^{-10}
P1409	32.00–43.30	3.07	360.0	1×10^{-9}	4×10^{-10}
P1410	16.00–43.30	2.79	360.3	6×10^{-9}	2×10^{-9}
P1411	8.50–43.30	2.41	360.7	4×10^{-7}	1×10^{-8}
P1412	0.00–8.50	2.31	360.8	2×10^{-8}	4×10^{-9}

* Les profondeurs sont mesurées en mètres au-dessous du sommet du tubage, dans la direction du sondage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Mauvaise garniture d'étanchéité, résultats non fiables.

Annexe B

Résumé des mesures de la hauteur piézométrique, sondages LEB-1, 2, 3 et 4, octobre 1984 à octobre 1985

Tableau B-1. Sommaire des mesures de la charge hydraulique sondage LEB-1

Numéro de l'orifice	Hauteur de l'orifice (m)*	Charge hydraulique (m)*								
		21 oct. 84	21 nov. 84	19 mars 85	11 avr. 85	1 mai 85	2 mai 85	6 mai 85	7 mai 85	16 mai 85
1	-224.1	439.1	409.0	–	–	–	397.8	–	398.2	398.0
2	-204.6	442.3	411.4	–	–	–	399.7	–	399.2	399.3
3	-188.1	461.7	428.6	–	–	–	406.0	–	405.1	404.2
4	-150.6	400.6	395.4	–	–	–	396.4	–	397.3	395.1
5	-138.6	401.1	395.5	–	–	–	396.5	–	397.2	395.1
6	-104.1	397.2	395.6	–	–	–	396.4	–	397.2	395.0
7	-66.6	396.9	392.3	–	–	–	389.1	–	389.0	388.8
8	-32.1	397.7	390.9	–	–	–	393.8	–	391.9	391.5
9	-12.6	399.3	396.8	–	–	–	396.1	–	394.4	393.9
10	6.8	396.0	392.1	–	–	–	390.7	–	389.6	389.3
11	38.3	395.3	392.3	–	–	–	390.7	–	389.5	389.2
12	66.8	417.4	405.6	–	–	–	405.8	–	405.7	405.8
13	104.3	393.6	392.4	392.9	395.4	391.8	390.6	390.9	389.7	389.7
14	135.8	417.1	395.5	396.4	397.1	394.2	393.9	393.8	393.3	392.4
15	164.3	416.8	399.9	400.7	400.9	400.7	400.9	401.0	400.8	400.6
16	183.8	400.3	400.0	400.0	400.1	400.1	400.2	400.0	399.9	400.1
17	198.8	400.4	399.9	400.0	400.1	400.1	400.2	400.1	400.1	400.1
18	201.8	400.3	400.0	400.1	400.1	400.1	400.1	400.1	400.1	400.1
19	206.3	465.9	428.7	410.1	409.3	408.8	407.7	406.1	405.9	406.7
20	216.8	450.8	424.2	406.5	406.3	406.8	406.0	405.2	405.0	405.8
21	239.3	401.1	399.0	402.4	401.8	402.0	401.5	401.6	401.1	402.3
22	260.3	400.4	400.4	400.3	400.4	400.4	400.4	400.3	400.4	400.3
23	276.8	400.5	400.4	400.4	400.4	400.4	400.4	400.3	400.4	400.4
24	296.3	400.6	400.5	400.4	400.6	400.5	400.6	400.4	–	400.4
25	308.3	400.4	400.4	400.3	400.6	400.4	400.5	400.3	–	400.4
26	321.8	400.6	400.4	400.3	400.5	400.5	400.4	400.4	–	400.4
27	336.8	400.6	400.4	400.6	400.7	400.5	400.6	400.4	–	400.4
28	350.3	400.8	400.8	401.1	401.3	401.0	401.1	400.7	–	400.8
29	366.8	401.5	401.3	401.8	401.3	401.3	401.3	401.3	–	401.3
30	377.3	401.6	401.4	401.3	401.3	401.3	401.4	401.3	–	401.3
31	386.3	401.6	401.5	401.4	401.4	401.4	401.4	401.3	–	401.3
32	393.8	402.0	401.8	401.6	401.6	401.6	401.6	401.7	–	401.6
33	396.8	403.0	403.3	403.2	403.6	403.3	403.4	403.4	–	403.1

* Mètres au-dessus du niveau de la mer.

Tableau B-2. Sommaire des mesures de la charge hydraulique sondage LEB-1

Numéro de l'orifice	Hauteur de l'orifice (m)**	Charge hydraulique (m)**								
		23 mai 85	7 juin 85	9 juin 85	4 juil. 85	3 août 85	28 août 85	19 sept. 85	15 oct. 85	15 oct. 85*
1	-224.1	398.7	399.4	400.8	–	405.8†	–†	394.2	399.4	390.6
2	-204.6	400.8	401.5	403.9	–	406.1	–‡	395.5	399.4	388.7
3	-188.1	404.7	404.7	405.6	–	410.7	–‡	396.3	397.8	385.5
4	-150.6	395.9	395.1	395.5	395.5	394.2	–‡	385.1	386.2	381.6
5	-138.6	396.0	395.1	395.5	395.5	394.4	–‡	385.5	386.5	381.6
6	-104.1	395.8	395.0	395.5	395.1	394.0	–	382.8	386.0	381.8
7	-66.6	388.8	388.6	388.5	388.3	387.7	385.0	377.1	381.1	381.4
8	-32.1	392.1	390.9	390.8	391.0	391.7	395.9	386.6	381.8	381.5
9	-12.6	394.5	393.0	393.7	393.7	393.2	397.3	388.5	387.0	383.1
10	6.8	390.0	389.0	389.2	390.3	389.8	393.0	385.4	385.5	382.3
11	38.3	389.6	389.1	389.1	388.8	388.1	386.4	381.1	382.8	382.9
12	66.8	405.7	405.6	405.8	405.7	405.7	404.4	405.4	405.8	385.8
13	104.3	389.9	389.5	389.7	390.4	388.4	386.4	384.9	383.8	382.1
14	135.8	394.0	393.3	393.7	394.0	401.2	398.4	395.4	396.3	384.1
15	164.3	400.8	400.7	400.9	400.9	402.3	403.2	402.7	402.3	398.9
16	183.8	400.0	400.1	–	399.7	399.2	399.2	399.0	399.5	399.5
17	198.8	400.0	399.9	–	399.7§	399.2	399.2	399.2	399.4	399.5
18	201.8	400.0	399.9	–	399.7	399.3	399.2	399.2	399.5	399.5
19	206.3	406.3	406.3	–	406.1	407.7	406.4	406.7	403.8	400.8
20	216.8	406.3	405.5	–	405.6	405.9	405.4	405.6	403.4	399.2
21	239.3	401.3	401.3	–	401.1	400.6	401.1	401.3	401.3	399.0
22	260.3	400.1	400.1	–	399.7	399.4	399.4	399.5	399.9	399.7
23	276.8	400.2	400.1	–	399.9	399.6	399.4	399.5	400.1	400.3
24	296.3	400.4	400.2	–	399.9	399.7	399.6	399.6	400.2	400.3
25	308.3	400.3	400.2	–	399.9	399.7	399.6	399.6	400.1	400.1
26	321.8	400.3	400.2	–	399.8	399.7	399.7	399.7	400.2	400.2
27	336.8	400.4	400.4	–	400.1	399.9	401.1	399.7	400.3	400.4
28	350.3	400.7	400.6	–	400.4	400.2	400.0	400.1	400.5	400.6
29	366.8	401.2	401.2	–	400.9	400.9	400.8	400.8	401.5	401.7
30	377.3	401.3	401.3	–	401.0	400.8	400.9	400.8	401.5	401.6
31	386.3	–	401.3	–	401.1	401.0	400.9	400.9	401.6	401.8
32	393.8	401.5	401.6	–	401.3	401.1	400.6	401.1	402.0	402.3
33	396.8	403.0	403.0	–	402.5	402.4	402.8	401.9	403.6	403.9

* Vérification du bon état du tubage, profil établi avec le niveau hydrostatique abaissé dans le tubage.
** Mètres au-dessus du niveau de la mer.
† Orifice de pompage nº 1, ouvert le 14 juillet 1985, pompé du 28 août au 10 septembre 1985, fermé le 18 septembre 1985.
‡ Orifices de pompage nºs 2 et 5, ouverts le 5 août 1985, pompés du 28 août au 10 septembre 1985, fermés le 18 septembre 1985.
§ Orifice de pompage nº 17, ouvert le 5 juillet 1985, pompé du 5 au 11 juillet 1985, fermé le 11 juillet 1985.

Tableau B-3. Sommaire des mesures de la charge hydraulique sondage LEB-2

Numéro de l'orifice	Hauteur de l'orifice (m)*	Charge hydraulique (m)*							
		16 oct. 84	20 nov. 84	20 mars 85	12 avr. 85	2 mai 85	3 mai 85	4 mai 85	8 mai 85
1	-361.2	389.5	388.9	–	–	–	–	–	391.1
2	-304.2	410.1	403.7	–	–	–	398.2	–	397.3
3	-272.7	409.5	395.7	–	–	–	398.3	–	397.3
4	-238.2	384.3	379.2	–	–	–	385.2	–	384.8
5	-203.7	376.9	375.5	–	–	–	374.9	–	375.5
6	-184.2	376.2	374.6	–	–	–	372.9	–	372.9
7	-161.2	382.6	375.7	–	–	–	375.0	–	374.3
8	-145.2	386.0	377.9	–	–	–	378.0	–	375.9
9	-113.7	375.8	375.8	–	–	–	375.3	–	375.7
10	-82.2	386.2	376.0	–	–	–	373.9	–	371.9
11	-50.2	413.3	386.6	–	–	–	376.2	–	375.5
12	-23.7	394.9	389.7	–	–	–	383.1	–	380.7
13	19.8	397.8	384.7	–	–	–	378.8	–	375.0
14	45.8	389.7	389.0	–	–	–	391.1	–	390.4
15	64.8	385.6	385.7	–	–	–	386.2	–	385.9
16	96.3	389.7	385.9	383.9	384.9	387.5	386.4	385.3	386.1
17	127.8	389.8	385.7	380.2	380.4	382.4	381.8	381.7	–
18	159.3	389.0	384.4	380.2	379.8	379.5	379.6	379.8	379.7
19	184.8	386.9	384.2	381.5	381.2	381.9	382.1	380.7	380.4
20	216.3	386.5	388.8	381.0	381.9	382.1	380.0	380.5	380.0
21	235.8	396.2	394.1	395.4	394.4	395.6	396.8	395.9	396.1
22	261.3	385.1	381.1	380.2	380.7	380.9	380.7	380.9	–
23	280.8	383.6	380.0	379.1	379.5	379.7	379.7	379.8	–
24	286.8	383.3	380.0	379.0	379.5	379.7	379.8	379.7	–
25	297.3	378.8	376.8	376.2	376.2	376.2	376.2	376.3	–
26	310.8	378.9	376.4	376.2	376.5	377.4	376.7	376.7	–
27	324.3	378.6	376.0	375.1	375.8	376.4	376.0	375.9	–
28	339.3	386.1	393.1	392.5	391.2	392.0	392.3	391.3	–
29	345.3	386.2	393.0	393.0	392.1	392.7	392.9	392.0	–
30	355.8	390.6	395.7	394.2	392.5	392.4	392.1	390.9	–
31	363.3	393.6	393.5	393.3	393.5	393.3	393.4	393.5	–
32	373.8	393.3	393.5	393.3	393.5	393.3	393.4	393.5	–
33	381.3	393.7	394.0	393.8	394.0	393.9	–	394.0	–
34	385.8	394.2	394.5	395.0	394.9	394.9	394.7	395.2	–

* Mètres au-dessus du niveau de la mer.

Tableau B-4. Sommaire des mesures de la charge hydraulique sondage LEB-2

Numéro de l'orifice	Hauteur de l'orifice (m)*	Charge hydraulique (m)**							
		16 mai 86	24 mai 85	6 juin 85	2 août 85	7 sept. 85	18 sept. 85	17 oct. 85	17 oct. 85*
1	-361.2	–	392.2	393.1	396.3	–	395.6	395.2	393.9
2	-304.2	396.4	396.3	–	403.7	–	408.6	401.1	–
3	-272.7	396.4	396.2	396.6	402.6	–	408.2	401.0	395.5
4	-238.2	384.5	385.7	386.2	388.3	–	390.4	–	–
5	-203.7	375.7	375.7	374.7	–	–	373.0	374.0	371.9
6	-184.2	373.1	373.2	373.9	375.6	–	372.3	372.1	371.7
7	-161.2	372.8	372.8	372.8	373.5	–	372.4	372.1	371.2
8	-145.2	376.5	376.6	377.1	379.8	–	375.8	375.9	372.7
9	-113.7	371.7	371.3	371.0	371.0	–	370.6	370.1	370.5
10	-82.2	372.1	372.1	372.4	375.3	–	372.8	372.4	369.8
11	-50.2	375.6	376.2	376.7	378.5	–	378.5	378.2	374.0
12	-23.7	380.6	383.8	–	396.5	–	393.6	391.1	381.1
13	19.8	374.7	376.3	377.9	384.1	–	384.4	382.8	373.9
14	45.8	389.9	390.5	390.3	389.0	–	390.0	389.2	378.8
15	64.8	385.7	386.7	387.3	389.0	–	388.0	387.2	377.5
16	96.3	385.6	386.9	387.6	388.9	386.8	387.9	387.1	376.9
17	127.8	381.3	381.9	382.4	382.2	384.7	384.3	382.0	375.0
18	159.3	380.0	379.9	379.7	378.5	377.7	375.8	374.0	374.0
19	184.8	380.2	380.7	381.0	381.2	380.8	379.2	376.1	375.3
20	216.3	380.0	380.5	379.9	379.0	379.3	376.6	375.9	375.6
21	235.8	395.9	396.5	396.2	395.9	380.0†	377.3	377.4	376.2
22	261.3	380.8	380.8	380.5	379.6	379.3	376.2	377.2	377.3
23	280.8	379.7	379.7	379.3	378.3	377.9‡	374.7‡	375.5	375.7
24	286.8	379.7	379.6	379.3	378.3	378.0	374.6	375.5	375.5
25	297.3	376.0	376.2	375.5	374.6	374.7	372.8	373.8	373.9
26	310.8	376.2	376.5	376.0	374.9	374.6	373.1	373.9	373.7
27	324.3	375.9	376.1	375.4	374.4	374.2	372.8	373.7	373.8
28	339.3	390.7	391.6	392.2	383.4	382.8	379.4	379.1	373.2
29	345.3	391.1	392.2	392.2	385.9	386.2	381.2	380.2	373.8
30	355.8	389.8	391.5	389.7	389.5	388.3	389.3	387.4	383.8
31	363.3	393.4	393.1	393.0	392.3	392.3	392.4	393.5	393.3
32	373.8	393.3	393.1	393.0	392.3	392.3	392.5	393.5	393.5
33	381.3	393.8	393.7	393.6	392.9	392.9	393.0	394.0	393.9
34	385.8	394.6	394.6	394.5	393.8	394.0	393.9	394.7	394.1

* Vérification du bon état du tubage, profil établi avec le niveau hydrostatique abaissé dans le tubage.

** Mètres au-dessus du niveau de la mer.

† Orifice de pompage nº 21, ouvert le 7 août 1985, fermé le 7 août 1985.

‡ Orifice de pompage nº 23, ouvert le 7 août 1985, fermé le 5 septembre 1985, ouvert le 8 septembre 1985, pompé les 10 et 11 septembre 1985, fermé le 18 septembre 1985, ouvert le 19 septembre 1985, pompé les 19 et 20 septembre 1985, fermé le 8 octobre 1985.

Tableau B-5. Sommaire des mesures de la charge hydraulique sondage LEB-3

Numéro de l'orifice	Hauteur de l'orifice (m)*	Charge hydraulique (m)*							
		22 oct. 84	22 nov. 84	19 mars 85	11 avr. 85	1 mai 85	3 mai 85	6 mai 85	8 mai 85
1	136.2	371.9	366.3	360.5	359.8	359.6	359.5	359.3	359.3
2	163.2	373.3	368.7	367.0	366.3	367.1	365.3	366.5	364.8
3	185.7	382.2	374.8	372.8	372.1	372.6	370.7	371.7	370.3
4	208.2	386.2	380.3	377.0	376.9	375.9	374.9	376.2	374.8
5	233.7	395.0	382.9	380.4	380.2	379.3	378.5	379.5	378.5
6	253.2	395.0	385.7	380.9	380.1	378.8	378.5	379.6	378.4
7	272.7	394.6	384.5	383.6	382.7	381.9	381.9	382.5	381.0
8	298.2	386.6	383.6	383.3	382.7	386.2	386.2	386.6	384.4
9	314.7	390.4	381.5	381.6	381.4	384.2	384.2	384.5	383.5
10	334.2	393.9	381.9	381.6	381.6	382.7	382.8	383.2	382.6
11	347.7	381.0	380.9	381.0	381.0	380.9	380.9	380.9	381.0
12	365.7	380.9	380.8	380.9	380.9	380.8	380.7	380.9	380.9
13	376.2	380.9	380.9	380.9	380.9	380.7	380.7	380.8	380.9

* Mètres au-dessus du niveau de la mer.

Tableau B-6. Sommaire des mesures de la charge hydraulique sondage LEB-3

Numéro de l'orifice	Hauteur de l'orifice (m)*	Charge hydraulique (m)*						
		15 mai 85	23 mai 85	11 juin 85	1 août 85	7 sept. 85	19 sept. 85	23 oct. 85
1	136.2	359.3	359.0	359.0	357.9	357.9	357.9	357.7
2	163.2	364.2	365.3	365.0	364.8	366.2	363.2	363.9
3	185.7	369.3	370.8	370.4	370.5	371.7	368.6	369.3
4	208.2	373.2	374.8	374.7	374.3	374.7	371.6	373.3
5	233.7	377.9	378.6	378.5	378.5	378.4	376.6	377.3
6	253.2	378.4	378.1	378.7	378.6	378.4	377.0	377.6
7	272.7	381.5	381.4	381.2	381.9	–	379.5	380.6
8	298.2	385.6	385.4	382.4	384.0	381.6	379.8	380.7
9	314.7	383.3	383.2	381.4	381.9	380.6	379.7	380.2
10	334.2	382.4	382.8	381.6	381.8	381.2	380.4	381.1
11	347.7	380.8	380.7	380.5	380.7	380.8	380.4	381.0
12	365.7	380.7	380.6	380.4	380.5	–	380.6	380.8
13	376.2	380.7	380.5	380.4	380.6	–	380.3	380.9

* Mètres au-dessus du niveau de la mer.

Tableau B-7. Sommaire des mesures de la charge hydraulique sondage LEB-4

Numéro de l'orifice	Hauteur de l'orifice (m)*	Charge hydraulique (m)*							
		4 oct. 84	2 nov. 84	10 avr. 85	20 mars 85	2 mai 85	4 mai 85	6 mai 85	7 mai 85
1	-32.4	389.8	390.6	–	–	–	355.7	–	–
2	-10.0	348.4	–	–	–	–	352.5	–	–
3	-7.2	348.4	354.0	–	–	–	352.6	–	–
4	8.2	420.0	387.6	–	–	–	364.3	–	–
5	27.4	398.2	390.6	–	–	–	368.4	–	–
6	41.8	402.3	387.5	–	–	–	364.6	–	–
7	71.2	385.6	377.5	–	–	–	361.1	–	–
8	95.1	383.1	367.2	–	–	–	361.2	–	–
9	107.7	419.2	391.7	381.0	381.5	380.3	379.4	–	378.8
10	137.1	–	–	391.9	392.8	392.5	391.1	–	392.1
11	155.3	395.5	394.1	388.5	392.7	392.5	390.9	–	392.1
12	173.5	401.2	392.3	388.8	389.9	390.8	389.9	–	390.9
13	194.5	388.8	388.2	388.3	386.6	388.1	387.3	–	388.4
14	215.5	397.0	398.0	397.8	397.1	398.3	396.8	–	398.2
15	222.5	396.1	398.5	398.5	398.5	398.6	397.6	–	398.5
16	232.3	396.3	–	398.6	398.1	398.6	–	398.3	398.5
17	240.7	396.3	398.7	398.6	398.3	398.7	397.7	398.4	398.4
18	247.7	396.8	398.4	398.4	398.3	398.8	397.6	398.5	398.5
19	260.3	396.7	398.9	398.7	398.7	398.8	398.0	398.7	398.6
20	278.5	397.7	378.7	398.8	398.1	398.9	398.2	399.0	398.8
21	291.1	398.7	397.5	397.9	397.9	398.4	397.8	398.5	398.1
22	303.7	399.1	401.8	401.2	401.4	401.5	400.8	401.6	401.3
23	319.1	399.2	399.7	398.8	398.7	399.3	–	399.4	399.1
24	331.7	398.5	399.4	398.5	397.3	399.2	–	399.5	399.2
25	347.1	398.7	399.7	398.6	398.2	399.1	–	399.7	398.8
26	365.3	399.0	401.5	400.6	400.8	400.8	–	401.2	400.8
27	377.9	399.2	401.6	402.1	400.8	401.0	–	401.3	400.8
28	387.7	417.2	401.7	400.8	401.0	401.1	–	401.4	401.0
29	394.7	399.3	401.8	400.8	401.0	401.1	–	401.6	401.0

* Mètres au-dessus du niveau de la mer.

Tableau B-8. Sommaire des mesures de la charge hydraulique sondage LEB-4

Numéro de l'orifice	Hauteur de l'orifice (m)**	Charge hydraulique (m)*							
		8 mai 85	8 mai 85	16 mai 85	22 mai 85	1 août 85	28 août 85	20 sept. 85	23 oct. 85
1	-32.4	355.1	–	354.7	354.7	349.1	–	353.1	353.1
2	-10.0	352.6	–	352.2	–	350.1*	–	350.4	349.6
3	-7.2	352.1	–	352.3	352.4	350.2*	–	350.3	349.8
4	8.2	365.5	–	365.1	363.6	361.2	–	361.5	362.7
5	27.4	369.5	–	369.4	367.7	365.6	–	365.6	366.8
6	41.8	365.3	–	364.6	363.1	360.8	–	361.5	362.6
7	71.2	361.2	–	360.8	360.5	358.8	–	358.6	358.1
8	95.1	361.4	–	360.8	360.8	360.9	–	358.9	357.4
9	107.7	378.7	–	379.1	378.1	374.3	374.8	373.9	370.6
10	137.1	391.1	–	390.9	390.8	391.2	390.3	388.7	387.1
11	155.3	391.5	–	390.8	390.5	391.1	389.3	387.4	385.8
12	173.5	390.0	–	390.3	390.5	390.0	389.5	388.1	385.5
13	194.5	387.1	–	387.3	387.8	387.7	387.2	385.8	384.3
14	215.5	397.6	–	397.2	397.8	397.7	397.2	395.9	394.8
15	222.5	397.6	–	397.5	398.0	398.1	397.4	396.0	395.1
16	232.3	397.7	–	397.7	398.0	397.9	397.5	396.2	395.3
17	240.7	397.1	–	397.6	398.4	398.0	397.5	396.3	–
18	247.7	398.0	–	397.7	398.1	398.0	397.7	396.3	395.5
19	260.3	398.2	–	397.9	398.3	398.3	397.7	396.5	395.8
20	278.5	398.5	–	398.2	398.5	398.6	377.9	396.7	396.0
21	291.1	397.6	–	397.9	398.0	398.7	397.8	396.8	389.2†
22	303.7	400.9	401.4	400.9	401.0	400.9	400.0	399.1	398.0
23	319.1	398.8	399.2	398.8	398.9	–	398.2	397.3	396.7
24	331.7	399.0	399.0	398.9	399.0	398.7	398.2	397.5	396.8
25	347.1	399.1	398.8	399.1	398.7	395.9	398.2	399.7	396.6
26	365.3	400.6	400.8	400.5	400.7	401.2	400.0	399.3	398.8
27	377.9	400.8	400.9	400.7	400.9	401.4	400.0	399.4	399.0
28	387.7	387.6	387.4	400.8	400.9	401.5	400.1	399.5	399.1
29	394.7	401.0	401.0	400.9	401.1	401.6	400.2	399.6	399.2

* Les orifices de pompage nos 2 et 3, ouverts le 4 juin 1985, pompés du 4 juin au 4 août 1985, fermés le 7 août 1985.

† Orifice de pompage no 21, ouvert le 2 octobre 1985, pompé du 3 octobre au 9 octobre 1985, fermé le 9 octobre 1985.

** Mètres au-dessus du niveau de la mer.

Annexe C

Méthodes analytiques pour les éléments principaux et secondaires et les métaux à l'état de traces

Méthodes analytiques pour les éléments principaux et secondaires et les métaux à l'état de traces

DOSAGE DES CATIONS ET DES MÉTAUX À L'ÉTAT DE TRACES

Les cations et les métaux à l'état de traces ont été dosés par spectroscopie d'absorption atomique. Cette méthode a été choisie pour sa vitesse, sa facilité d'utilisation et ses perturbations relativement minimes. Une description du système, ses perturbations, les résultats et leur analyse sont résumés pour les dosages des échantillons géochimiques du lac East Bull recueillis en 1984 et 1985.

Les instruments employés pour cette étude comprenaient un spectrophotomètre d'absorption atomique du laboratoire des instruments, modèle 251, équipé de 2 brûleurs à flamme air/acétylène et oxyde azoteux. Un tube photomultiplicateur R-955 et un monochromateur Ebert muni de fentes courbées variables d'une largeur minimale de 0.04 nm. Comme source de lumière, on a utilisé des lampes à cathode creuse à élément unique et des lampes à décharge sans électrode, au potassium et au sodium. Un enregistreur Esterline Angus a été utilisé pour enregistrer les résultats.

Toutes les solutions étalons ont été préparées à partir de produits chimiques de qualité de réactifs ou ont été achetés sous forme de solutions mères de 1000 $mg \cdot L^{-1}$. L'eau a été purifiée avec un système Milli-R.O., Milli-Q (Millipore Corp.).

Les perturbations dans les systèmes d'absorption atomique sont de plusieurs types : chimiques, de matrice, d'ionisation. Des perturbations chimiques se produisent lorsque l'élément dosé se combine chimiquement avec d'autres composantes du réactifs dans le même échantillon. La composante résultante influe sur le processus d'atomisation dans la flamme, ce qui modifie le nombre d'atomes libres disponibles pour absorber la lumière. Les perturbations chimiques ont été limitées par l'addition d'un agent de libération, c'est-à-dire dans le cas du calcium, du lanthanum à 2000 $mg \cdot L^{-1}$.

Des perturbations de matrice se produisent lorsque certaines propriétés physiques telles que la viscosité ou la tension superficielle de l'échantillon et de l'étalon diffèrent. Ces perturbations peuvent se produire lorsque les échantillons contiennent de fortes concentrations de sels dissous. Les perturbations de matrice ont été limitées par dilution de l'échantillon jusqu'à ce que l'effet des sels dissous soit négligeable.

Des perturbations d'ionisation se produisent lorsque la température de la flamme est suffisamment élevée pour ioniser une proportion importante de l'élément dosé. Cette perturbation a été limitée par l'addition de 2000 $mg \cdot L^{-1}$ de potassium ou de sodium selon l'élément visé.

Pour doser les échantillons, on a étudié la partie linéaire de la courbe de Beer, dans les limites d'utilisation de l'appareil. Tous les échantillons dont les cations ont été dosés et prétraités de façon à éliminer les effets des perturbations, et dilués jusqu'à ce qu'ils se situent dans la plage linéaire de l'élément étudié. Aucune correction de courbe n'a été faite; on n'a eu recours qu'à la dilution.

Les précisions globales ont été calculées par rapport à des courbes d'étalonnage des moindres carrés et sont de la forme $St = mx + c$, où x = la concentration de l'échantillon dosé, en milligrammes par litre, et c = l'ordonnée à l'origine pour une concentration nulle. Les écarts de précision globale pour les divers éléments sont attribuables à la linéarité des échantillons analysés. Le silicium est linéaire à 150 $mg \cdot L^{-1}$ et son dosage est relativement précis (±4.4 %), tandis que le magnésium est linéaire à 0.4 $mg \cdot L^{-1}$ et son dosage est bien moins précis (±15.8 %). L'ordre de précision des dosages est le suivant : Sr>Si>Ca>Na>K>Mg; et le silicium est linéaire aux concentrations les plus élevées, suivi de Sr>Ca>Na>K>Mg.

Les métaux totaux à l'état de traces ont été dosés par aspiration directe soit dans une flamme d'air-acétylène, soit dans une flamme d'oxyde azoteux. Tous les étalons et les échantillons ont été analysés dans l'acide nitrique concentré à 8 $mL \cdot L^{-1}$. Les précisions globales ont été calculées selon la relation $St = mx + c$.

Les sensibilités ont aussi été déterminés à partir de courbes d'étalonnage des moindres carrés et les seuils de détection ont été établis à 1 % d'absorption ou à 0.0044 unité d'absorbance (tableau C-1).

Tableau C-1. Plages linéaires, précisions globales, seuils de détection et traitements d'échantillons pour l'interaction d'ionisation pour les cations ou les métaux à l'état de traces dosés

Élément	Seuil de détection ($mg \cdot L^{-1}$)	Place linéaire ($mg \cdot L^{-1}$)	Précision (± %)	Traitement étalon/échantillon
Calcium	0.05	0.05-3.0	5.5	2000 $mg \cdot L^{-1}$ La^{3+} dans 4 $mL \cdot L^{-1}$ HCl; flamme acétylène/air
Magnésium	0.003	0.003-0.4	15.8	2000 $mg \cdot L^{-1}$ La^{3+} dans 4 $mL \cdot L^{-1}$ HCl; flamme acétylène/air
Potassium	0.01	0.01-0.4	15.4	2000 $mg \cdot L^{-1}$ Cs^{+} dans 4 $mL \cdot L^{-1}$ HCl pour limiter l'ionisation du K^{+}; flamme acétylène/air
Sodium	0.001	0.001-1.0	11.1	2000 $mg \cdot L^{-1}$ K^{+} dans 4 $mL \cdot L^{-1}$ HCl pour limiter l'ionisation du Na^{+}; flamme acétylène/air
Silicium	0.8	0.8-150	4.4	Échantillons et étalons dans 4 $mL \cdot L^{-1}$ HCl; flamme acétylène/oxyde azoteux
Strontium	0.06	0.06-5.0	3.3	2000 $mg \cdot L^{-1}$ dans 4 $mL \cdot L^{-1}$ HCl ajouté pour limiter l'ionisation du strontium; flamme acétylène/oxyde azoteux
Aluminium	0.40	0.40-60	8.5	2000 $mg \cdot L^{-1}$ K^{+} dans 8 $mL \cdot L^{-1}$ HNO_3; flamme acétylène/oxyde azoteux
Chrome	0.06	0.06-5.0	11.5	8 $mL \cdot L^{-1}$ HNO_3; flamme acétylène/oxyde azoteux
Cuivre	0.03	0.03-4.0	10.8	8 $mL \cdot L^{-1}$ HNO_3; flamme acétylène/air
Fer	0.04	0.04-5.0	10.4	8 $mL \cdot L^{-1}$ HNO_3; flamme acétylène/air
Plomb	0.1	0.1-15.0	12.0	8 $mL \cdot L^{-1}$ HNO_3; flamme acétylène/air
Manganèse	0.04	0.04-3.0	16.0	8 $mL \cdot L^{-1}$ HNO_3; flamme acétylène/air
Nickel	0.06	0.06-5.0	18.5	8 $mL \cdot L^{-1}$ HNO_3; flamme acétylène/air
Zinc	0.02	0.01-1.0	13.0	8 $mL \cdot L^{-1}$ HNO_3; flamme acétylène/air

DOSAGE DES ANIONS

La technique de la chromatographie d'échange d'ions (C.I.) est bien reconnue pour le dosage des ions inorganiques dans une variété de matrices aqueuses et a été utilisée pour doser les anions des échantillons du lac East Bull.

Les analyses sur le terrain des eaux souterraines du lac East Bull ont indiqué l'existence d'une grande variété de matrices présentant des pH variables (6 à 10), des conductivités de 100 à 6000 $\mu S \cdot cm^{-1}$ et des teneurs en chlorures de moins de 1.0 à environ 2500 $mg \cdot L^{-1}$. Puisque la C.I. a été choisie comme méthode analytique pour le dosage des anions, des recherches ont été entreprises pour déterminer si les pH variables et les concentrations élevées de chlorures avaient un effet sur la séparation et la quantification des anions désirés.

Tous les anions ont été dosés au moyen d'un chromatographe d'échange d'ions Dionex 12, équipé d'un concentrateur d'anions de 4 × 30 mm, d'une colonne de séparation des anions de 4 × 250 mm et d'un suppresseur à fibres creuses.

Pour l'analyse on a utilisé un éluant étalon, soit Na_2CO_3, 0.0024*M*/$NaHCO_3$, 0.003*M*, ainsi qu'une boucle d'injection d'échantillons de 100 μL réglée à un débit de 138 $mL \cdot h^{-1}$. Les anions élués ont été détectés par un conductancemètre Dionex, puis quantifiés à l'aide d'un intégrateur Hewlett Packard 3390A.

La détection électrochimique des bromures et des iodures a été faite avec un détecteur ampérométrique Dionex pour chromatographie d'échange d'ions. La cellule se compose d'une électrode de travail en argent de 1.3 cm de long × 0.178 cm de diamètre, d'une électrode de référence en Ag/AgCl isolée de la phase mobile par une membrane échangeuse de cations en Nafion et d'une contre-électrode en platine. La tension appliquée pour les bromures et les iodures était de +0.20 volt.

Les alcalinités totales ont été déterminées à l'aide d'un enregistreur potentiométrique Metrohm Herisau E536, d'un titrimètre automatique Dosimate E535 et d'une électrode à pH combinée Métrohm Ag 9100. Les alcalinités sont exprimées en milligrammes par litre de bicarbonate.

Toutes les solutions d'anions inorganiques étalons, comme les sels de potassium ou de sodium, ont été préparées à partir de produits chimiques de qualité de réactif. L'eau a été purifiée avec un système Milli-R.O., Milli-Q (Millipore Corp.).

Les chromatogrammes de solutions étalons de fluorure, de chlorure, de nitrite, de nitrate et de sulfate avec des pH de 2.5, 5.5 et 11.5 ont révélé que le pH n'est pas un facteur dans la séparation et la quantification des anions par C.I. Dans tous les cas, les valeurs obtenues se situaient à l'intérieur des limites de précisions de l'appareil. En ajoutant du HCl, on n'a pu évaluer l'effet du pH sur le dosage des chlorures.

Les eaux souterraines titrant de 100 à 1500 $mg \cdot L^{-1}$ de chlorure ont été aussi analysées par C.I. Des quantités de 100, 500 et 1000 $mg \cdot L^{-1}$ de chlorure ont été ajoutées aux solutions d'anions étalons (2 $mg \cdot L^{-1}$ F^-, 20 $mg \cdot L^{-1}$ NO_3^-, 20 $mg \cdot L^{-1}$ NO_3^-, 30 $mg \cdot L^{-1}$ $SO_4^=$. Puis, on a déterminé la séparation et le dosage des anions.

L'intégration des pics à partir des chromatogrammes a révélé que les additions de chlorure n'avaient pas d'effet notable sur la séparation et le dosage des fluorures, des nitrates ou des sulfates. Des études semblables ont montré que la réponse des sulfates est linéaire dans la plage de 0 à 80 $mg \cdot L^{-1}$ en présence de concentrations de chlorures allant jusqu'à 4000 $mg \cdot L^{-1}$. Les problèmes qui se sont posés pendant l'addition des chlorures étaient liés à la séparation et au dosage des nitrites. Après l'addition de 500 à 1000 $mg \cdot L^{-1}$ de chlorure, les pics des chlorures/nitrites étaient moins séparés.

Le dosage des nitrites dans les eaux souterraines du lac East Bull a nécessité une attention spéciale. Les teneurs en chlorures des sondages-P étaient suffisamment basses pour permettre le dosage des nitrites. Les sondages LEB-1, 2 et 4 avaient des teneurs variables en chlorures. Quelques teneurs étaient suffisamment basses pour permettre la séparation et le dosage de Cl^- et de NO_2^- et la quantification, mais nombreuses ne l'étaient pas. Les nitrites n'ont pu être dosés dans les sondages titrant plus de 500 $mg \cdot L^{-1}$ de chlorures. Les teneurs en nitrates des sondages 1, 2 et 4 sont en général inférieures à 0.2 $mg \cdot L^{-1}$. Le nitrate est dosable dans des solutions concentrées en chlorures. Avec d'aussi faibles teneurs en nitrates dans les sondages 1, 2 et 4 on estime que ces teneurs étaient < 0.02 $mg \cdot L^{-1}$. Les nitrates peuvent être dosés par C.I.; il suffit d'abord de faire passer l'échantillon à travers une résine échangeuse d'ions chargées d'argent pour précipiter la grande quantité de Cl^- sous forme de AgCl.

La concentration de chlorures, n'a posé aucun problème dans la détection électronique des bromures et des iodures. Une solution contenant 2500 fois plus de chlorures que de bromures a peu d'effet sur le dosage des bromures, puisque le potentiel d'électrodes étalon, E°, pour oxyder du Ag en AgCl est positif.

Les plages de linéarité obtenues avec le système 12 Dionex ont été établies suivant deux principes : 1) la quantité maximale d'analyte dosable sans traitement (dilution) de l'échantillon, 2) des écarts par rapport aux courbes d'étalonnage supérieurs aux seuils de précision.

Les sensibilités pour chaque anion ont été établies par rapport aux courbes étalons des moindres carrés. Les seuils de détection ont été établis en fonction de la résolution entre la hauteur des pics et le bruit de fond. Les seuils quantitatifs ont été établis en supposant un rapport entre le signal de l'analyte et le bruit de fond égal à cinq. En supposant que l'analyte ne surcharge pas la colonne du concentrateur, les seuils de détection peuvent être améliorés en portant le volume d'injection de 100 μL à 200 μL.

La précision ou reproductibilité des résultats a été calculée en supposant que les échantillons étaient homogènes, sans tenir compte des écarts entre les valeurs observées et la moyenne, dus à des erreurs systématiques ou constantes de mesure. La précision est exprimée en pourcentage de l'écart type par rapport à la moyenne. Les résultats sont basés sur l'intégration de 20 injections d'anions étalons, faites conjointement avec l'analyse des échantillons (tableau C-2).

Tableau C-2. Plages de linéarité, sensibilités et précisions pour les divers anions, telles que déterminées par C.I.

Anion	Plage de linéarité ($mg \cdot L^{-1}$)	Sensibilité ($mg \cdot L^{-1}$)	Précision (% E.T.R.)
Fluorure	0.2-10.0	0.2	5.0
Chlorure	0.2-10.0	0.2	5.4
Nitrite	0.2-40.0	0.2	4.1
Nitrate	0.2-80.0	0.2	8.6
Sulfate	2.0-80.0	2.0	10.0
Bromure	0.02-2.0	0.02	5.0
Iodure	0.04-10.0	0.04	5.8